



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

"La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra"



**INDICADORES EDÁFICOS PARA LA ALERTA
DE EROSIÓN Y DESERTIFICACIÓN AL SUR
DEL MUNICIPIO DE PUEBLA**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

YOLANDA PAOLA SILVA URIBE

Asesor de tesis:

Dr. Jesús Armando Ruiz Careaga

Noviembre 2017



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

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



**INDICADORES EDÁFICOS PARA LA ALERTA
DE EROSIÓN Y DESERTIFICACIÓN AL SUR
DEL MUNICIPIO DE PUEBLA**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

YOLANDA PAOLA SILVA URIBE

Comité tutorial:

Asesor y Tutor	Dr. Jesús Armando Ruiz Careaga
Integrante Comité Tutorial	Dra. Lucía López Reyes
Integrante Comité Tutorial	Dr. Ricardo Darío Peña Moreno
Integrante Comité Tutorial	Dr. Manuel Huerta Lara
Integrante Comité Tutorial	Dr. Daniel Jiménez García

Noviembre 2017



BUAP

C. YOLANDA PAOLA SILVA URIBE

Por este conducto me permito comunicarle que los miembros del jurado integrado por:

<i>Dr. Miguel Ángel Villalobos López</i>	<i>Presidente</i>
<i>Dra. Lucía López Reyes</i>	<i>Secretario</i>
<i>Dra. Gladys Linares Fleites</i>	<i>1er. Vocal</i>
<i>Dra. María Teresa Zayas Pérez</i>	<i>2do. Vocal</i>
<i>Dr. Ricardo Darío Peña Moreno</i>	<i>Suplente</i>

designado para la defensa de su tesis "*Indicadores edáficos para la alerta de erosión y desertificación al sur del municipio de Puebla*" han manifestado mediante su voto que ésta cumple con los méritos suficientes para ser defendida como tesis de grado de Maestría en Ciencias Ambientales, por lo que este Posgrado le autoriza la impresión de la misma.

Sin otro asunto en lo particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE

"PENSAR BIEN, PARA VIVIR MEJOR"

H. PUEBLA DE Z., NOVIEMBRE 27 DE 2017

DR. RICARDO DARÍO PEÑA MORENO
SECRETARIO ACADÉMICO



RDPM:amom
c.c.p. Archivo
c.c.p. Minutario.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) agradezco por el impulso a mi desarrollo intelectual y profesional a través del apoyo económico brindado para realizar y concluir este trabajo y los estudios de maestría.

Agradecimientos

Al Posgrado en Ciencias Ambientales de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) por el apoyo y las herramientas físicas e intelectuales proporcionadas, a través de los profesores, el espacio y materiales para el desarrollo y conclusión de este trabajo y de los estudios de maestría, así como para mi desarrollo personal y profesional.

Al Dr. Jesús Armando Ruíz Careaga, asesor de esta tesis, por darme la oportunidad de llevar a cabo esta investigación bajo su tutela, por su apoyo, paciencia y por compartirme sus conocimientos e impulsarme a adquirir nuevos.

Al Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas (DICA) de la BUAP, a través del Dr. José Víctor Tamariz Flores, por proporcionarme el material, equipo y espacio para el desarrollo de este trabajo. A los maestros César Calderón y Abel Cruz por el apoyo, enseñanzas y paciencia que me brindaron, lo que me permitió adquirir nuevos conocimientos y habilidades para mejora profesional, así como aprender en el camino.

Al Laboratorio de Microbiología del Suelo del Centro de Investigación en Ciencias Microbiológicas de la BUAP, a través de la Dra. Lucía López Reyes y del Dr. Moisés Carcaño Montiel, por el apoyo al desarrollo de esta investigación, proporcionándome el material, equipo y espacio para el desarrollo de la misma. A Lety y Ely, miembros de este centro de investigación; por el apoyo, paciencia y los conocimientos compartidos para el desarrollo de este trabajo.

A la Dra. Lucía López Reyes, por compartirme sus conocimientos y orientarme tanto para la mejora de este trabajo como para mi desarrollo personal y profesional.

Al Dr. Ricardo Darío Peña Moreno por los conocimientos compartidos tanto para el desarrollo de este trabajo como para el crecimiento en mi formación académica, y por el apoyo y paciencia brindados a cada paso de estos dos años.

A los miembros del comité tutorial; Dra. Lucía López Reyes, Dr. Ricardo Darío Peña Moreno, Dr. Manuel Huerta Lara y Dr. Daniel Jiménez García por sus enseñanzas, asesorías, apoyo, paciencia y guía para el desarrollo de este trabajo, así como por las observaciones realizadas para mejora del mismo.

A mis compañeros de la maestría, por permitirme aprender de ustedes y con ustedes, y por mostrarnos que las diferencias de carácter y pensamiento no condicionan la buena convivencia. Especialmente a Ricela Jano, Berenice Guzmán e Itzel Arroyo, por su valiosa amistad y por los momentos y experiencias compartidas a lo largo de estos dos años y en el desarrollo de cada una de las tesis.

A mi familia, por apoyarme, confiar en mí y alentarme, como siempre lo hacen; a esforzarme y ser valiente a cada paso.

A Dios, por todo.

Gracias.

Contenido

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN	2
III. MARCO TEÓRICO	3
3.1 Antecedentes	3
3.1.1 Distribución de las tierras secas	3
3.1.2 Desertificación	4
3.1.2.1 Concepto de desertificación	4
3.1.2.2 Causas de la desertificación	4
3.1.2.3 Consecuencias de la desertificación	4
3.1.2.4 Distribución de la desertificación.....	4
3.1.2.5 Estudios realizados sobre indicadores de desertificación	5
3.1.3 Erosión.....	6
3.1.3.1 Concepto de erosión	6
3.1.3.2 Causas de la erosión	6
3.1.3.3 Consecuencias de la erosión	6
3.1.3.4 Distribución de la erosión.....	7
3.1.3.5 Estudios realizados sobre indicadores de erosión	7
3.1.4 Indicador.....	8
3.1.4.1 Concepto de indicador	8
3.1.4.2 Características de un indicador	8
3.1.5 Tipo de investigación.....	8
IV. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	8
4.1 Pregunta de investigación	8
V. HIPÓTESIS	8
5.1 Hipótesis general	8
VI. OBJETIVOS.....	9
6.1 Objetivo general.....	9
6.2 Objetivos específicos.....	9
VII. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	9
7.1. Localización de la zona de estudio.....	9

7.2 Fase de gabinete	10
7.3 Fase de campo	11
7.3.1 Selección, descripción y muestreo de suelos.....	11
7.3.2 Muestreos de campo	11
7.3.3 Estimación de la erosión del suelo y del almacenamiento de carbono	12
7.4 Fase de laboratorio	13
7.4.1 Características del suelo a evaluar	13
7.4.1.1 Características morfológicas	13
7.4.1.2 Características físicas	15
7.4.1.3 Características químicas	16
7.4.1.4 Características biológicas	18
7.5 Análisis de resultados	19
VIII. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	19
8.1 Resultados fase de gabinete	20
8.2 Resultados fase de campo	26
8.2.1 Contorno I.	26
8.2.2 Contorno II.	35
8.2.3 Contorno III.	42
8.3 Resultados y discusión de las características del suelo evaluadas	51
8.3.1 Características morfológicas	52
8.3.2 Características físicas	60
8.3.3 Características químicas	64
8.3.4 Características biológicas	71
8.4 Estimación de la erosión del suelo	76
8.5 Estimación del almacenamiento de carbono en el suelo	77
8.6 Análisis de resultados	78
IX. CONCLUSIONES	82
X. ANEXOS	84
XI. BIBLIOGRAFÍA.....	89

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama del diseño de la investigación.	10
Figura 2. Zona de estudio, sur del municipio de Puebla.	11
Figura 3. Ubicación de los perfiles en el área de estudio.	20
Figura 4. Mapa climático de la zona de estudio.	21
Figura 5. Climogramas.	22
Figura 6. Mapa del relieve de la zona de estudio	23
Figura 7. Mapa geológico de la zona de estudio.	24
Figura 8. Mapa de uso de suelo en la zona de estudio.	25
Figura 9. Relieve del perfil TP01, en Santa María Guadalupe Tecola.	28
Figura 10. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP01.	28
Figura 11. Relieve del perfil TP02, en Santa María Guadalupe Tecola.	30
Figura 12. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP02.	30
Figura 13. Relieve del perfil TP03, en Santa María Guadalupe Tecola.	32
Figura 14. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP03.	32
Figura 15. Relieve del perfil TP04, en Santa María Guadalupe Tecola.	34
Figura 16. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP04.	34
Figura 17. Relieve del perfil TP05, en La Paz Tlaxcolpan.	37
Figura 18. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP05.	37
Figura 19. Relieve del perfil TP06, en La Paz Tlaxcolpan.	38
Figura 20. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP06.	40
Figura 21. Relieve del perfil TP07, en La Paz Tlaxcolpan.	41
Figura 22. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP07.	42
Figura 23. Relieve del perfil TP08, en San José el Rincón.	43
Figura 24. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP08.	45
Figura 25. Relieve del perfil TP09, en San José el Rincón.	45
Figura 26. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP09.	47
Figura 27. Relieve del perfil TP10, en San José el Rincón.	47
Figura 28. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP10.	49
Figura 29. Tipo de vegetación en el área de estudio.	51
Figura 30. Profundidad de los horizontes de los perfiles estudiados.	52

Figura 31. Color (Hue, Value, Chroma) de los perfiles estudiados.	54
Figura 32. Cambio en el desarrollo radicular de los perfiles del Contorno II.	57
Figura 33. Contenido de gravas, piedras y rocas de los perfiles estudiados.	59
Figura 34. Porcentaje de arcilla, limo y arena de los perfiles estudiados.	62
Figura 35. pH de los perfiles estudiados.	65
Figura 36. Porcentaje de carbonato de calcio equivalente de los perfiles estudiados.....	66
Figura 37. Porcentaje de materia orgánica y nitrógeno total de los perfiles estudiados.....	67
Figura 38. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los perfiles estudiados.....	69
Figura 39. Contenido de calcio (Ca) y magnesio (Mg) de los perfiles estudiados.	70
Figura 40. Contenido de sodio (Na) y potasio (K) de los perfiles estudiados.....	71
Figura 41. Unidades formadoras de colonias de Bacterias mesófilas aerobias, por gramo de suelo de los perfiles estudiados.....	73
Figura 42. Unidades formadoras de colonias de Gram negativas, por gramo de suelo de los perfiles estudiados.	73
Figura 43. Unidades formadoras de colonias de Actinomicetos, por gramo de suelo de los perfiles estudiados.	74
Figura 44. Unidades formadoras de colonias de Hongos, por gramo de suelo de los perfiles estudiados.....	75

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Características del perfil TP01 Santa María Guadalupe Tecola, Puebla.	26
Cuadro 2. Grados de erosión (García, 2016).	27
Cuadro 3. Características del perfil TP02 Santa María Guadalupe Tecola, Puebla.	29
Cuadro 4. Características del perfil TP03 Santa María Guadalupe Tecola, Puebla.	31
Cuadro 5. Características del perfil TP04 Santa María Guadalupe Tecola, Puebla.	33
Cuadro 6. Características del perfil TP05 La Paz Tlaxcolpan, Puebla.	36
Cuadro 7. Características del perfil TP06 La Paz Tlaxcolpan, Puebla.	39
Cuadro 8. Características del perfil TP07 La Paz Tlaxcolpan, Puebla.	41
Cuadro 9. Características del perfil TP08 San José el Rincón, Puebla.	44
Cuadro 10. Características del perfil TP09 San José el Rincón, Puebla.	46
Cuadro 11. Características del perfil TP10 San José el Rincón, Puebla.	48
Cuadro 12. Pendiente, grado de erosión, influencia humana y vegetación en los perfiles.	50
Cuadro 13. Estructura (tipo y tamaño) y sistema radicular (grosor y desarrollo) de los perfiles estudiados.	56
Cuadro 14. Textura de los perfiles estudiados.	61
Cuadro 15. Plasticidad y densidad aparente de los perfiles estudiados.	63
Cuadro 16. Actividad de la deshidrogenasa y relación Carbono/Nitrógeno de los perfiles estudiados.	72
Cuadro 17. Grado y estimación de la erosión de los perfiles estudiados.	76
Cuadro 18. Estimación de Carbono Orgánico del Suelo (COS) de los perfiles estudiados.	78
Cuadro 19. Coeficiente de correlación y valor de p de las características morfológicas.	79
Cuadro 20. Coeficiente de correlación y valor de p de las características físicas.	80
Cuadro 21. Coeficiente de correlación y valor de p de las características químicas.	80
Cuadro 22. Valor de p del análisis de varianza de las características biológicas.	80

I. INTRODUCCIÓN

La desertificación es un proceso de deterioro ambiental (Morales, 2005; Yang *et al.*, 2005; Abraham *et al.*, 2006) reconocido como una seria amenaza para los ecosistemas de tierras secas, los que son extremadamente vulnerables a la sobreexplotación y al uso inadecuado de la tierra (Morales, 2005; Hori *et al.*, 2011; CINU, 2015).

Las tierras secas representan cerca del 40% de la superficie terrestre (Hori *et al.*, 2011; UNEMG, 2011; SEMARNAT, 2013; van Oudenhoven *et al.*, 2015); en estas se encuentra alrededor del 44% de las tierras agrícolas y el 50% del ganado del mundo (Hori *et al.*, 2011; SEMARNAT, 2013; UNCCD, 2014b); y se conjugan problemas como la baja disponibilidad de agua, la degradación de la tierra, inseguridad alimentaria y migración (Díaz-Padilla *et al.*, 2011). En ellas viven poco más de 2 mil millones de personas; aproximadamente uno de cada tres habitantes del planeta; la mayoría en países en vías de desarrollo y en condiciones de pobreza (FAO, 2007a; Hori *et al.*, 2011; SEMARNAT, 2013; CINU, 2015). Alrededor del 25% de la superficie del planeta está afectada por la desertificación (FAO, 2007a; Díaz-Padilla *et al.*, 2011; Granados-Sánchez *et al.*, 2013; SEMARNAT, 2013); la que perjudica directamente a más de 250 millones de personas (FAO, 2007a; Maestre y Escudero, 2009; CINU, 2015) y pone en peligro los medios de vida de más de 1000 millones de habitantes al reducir la productividad de las tierras destinadas a la agricultura y la ganadería (Morales, 2005; Granados-Sánchez *et al.*, 2013; UNCCD, 2014a; UNCCD, 2014b; CINU, 2015).

La erosión del suelo a menudo es considerada como uno de los principales procesos conductores de la desertificación (Chartier *et al.*, 2009; Vanmaercke *et al.*, 2011; Granados-Sánchez *et al.*, 2013) y como uno de los problemas ambientales más importantes en el mundo (Rostagno y Degorgue, 2011; Wang *et al.*, 2016), que puede afectar la fertilidad del suelo y tener un impacto significativo sobre la productividad de la tierra (Rostagno y Degorgue, 2011; Chartier *et al.*, 2013; D'Odorico *et al.*, 2013), por lo que su prevención es crucial para revertir la degradación y mejorar la productividad de la tierra (van Oudenhoven *et al.*, 2015). La evaluación del proceso de desertificación, su cambio y tendencia, es fundamental en el desarrollo de acciones para prevenir y combatir los efectos adversos de este proceso (Yang *et al.*, 2005; Abraham *et al.*, 2006; Granados-Sánchez *et al.*, 2013). Asimismo, la medición, el monitoreo y la evaluación de la erosión del suelo es particularmente importante para mejorar la gestión de los recursos de la tierra (Chartier *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2016). El establecimiento de programas de monitoreo se considera una forma efectiva de evaluar el estado de los recursos naturales; dichos programas pueden proporcionar una señal de alerta,

como la detección de cambios en los atributos del ecosistema y de procesos en etapas en las cuales las acciones de gestión sean más rentables; por lo que el monitoreo de los procesos de desertificación y erosión; particularmente el desarrollo de sistemas de alerta, se ha vuelto cada vez más importante en la gestión de tierras áridas (Maestre y Escudero, 2009; Maestre y Puche, 2009; D'Odorico *et al.*, 2013; Ganasri y Ramesh, 2015). Uno de los métodos empleados para este fin es el uso de indicadores, los que proporcionan información y describen las transformaciones y el estado de un fenómeno con una precisión razonable, sin dejar de ser accesibles (Maestre y Puche, 2009; D'Odorico *et al.*, 2013; Becerril-Piña *et al.*, 2015).

De esta manera, en este trabajo se buscó, mediante la evaluación de características del suelo; determinar un conjunto de indicadores edáficos que pudieran ser empleados para la detección de procesos erosivos y de desertificación.

II. JUSTIFICACIÓN

La lucha contra la desertificación está estrechamente relacionada con la sostenibilidad de los ecosistemas de tierras áridas, y el sustento de las personas que habitan en ellas depende directamente de las acciones que se tomen para el manejo de la tierra (FAO, 2007a; Hori *et al.*, 2011). Asimismo, en las regiones áridas y semiáridas, la erosión del suelo puede tener un alto impacto en la calidad del mismo, y ha sido considerada como un componente significativo de los procesos de desertificación (Salvati *et al.*, 2008; Rostagno y Degorgue, 2011; Chartier *et al.*, 2013; Granados-Sánchez, *et al.*, 2013) así; para prevenir la desertificación, es fundamental el control de la erosión (Hori *et al.*, 2011); lo que hace importante identificar áreas vulnerables a estos procesos (Becerril-Piña *et al.*, 2014; Becerril-Piña *et al.*, 2015; Ganasri y Ramesh, 2015) e indicadores de un cambio inminente de los ecosistemas, a los estados de desertificación y erosión (D'Odorico *et al.*, 2013; Kairis *et al.*, 2014; Zurlini *et al.*, 2014). De esta manera, el desarrollo de sistemas de alerta son temas cada vez más importantes en la gestión de las tierras áridas y en el combate de dichos procesos (Abraham *et al.*, 2006; Maestre y Escudero, 2009; Zurlini *et al.*, 2014; Becerril-Piña *et al.*, 2015).

Los indicadores constituyen una herramienta útil para proporcionar información simplificada sobre el estado y la tendencia de un proceso (Brandt y Geeson; Abraham *et al.*, 2006; Vanmaercke *et al.*, 2011; Kairis *et al.*, 2014; Kosmas *et al.*, 2014); y mediante el uso de un conjunto apropiado de indicadores, se puede describir efectivamente el estado y tendencia de procesos complejos tales como la erosión del suelo y la desertificación (Rostagno y Degorgue, 2011; Vanmaercke

et al., 2011; Kairis *et al.*, 2014). Entre los parámetros que se han considerado para su uso como indicadores se encuentran diversos atributos de la vegetación, propiedades y características del suelo (Brandt y Geeson; Maestre y Escudero, 2009; Maestre y Puche, 2009; D'Odorico *et al.*, 2013). De esta forma, en el presente trabajo de investigación se buscó determinar un conjunto de características edáficas (morfológicas, físicas, químicas y biológicas) para la alerta de la erosión y desertificación; para lo que se requirió evaluar los cambios ocurridos en éstas, provocados por procesos erosivos en zonas secas.

La zona de estudio comprendió las localidades de Santa María Guadalupe Tecola, La Paz Tlaxcolpan y San José el Rincón, al sur del municipio de Puebla, México; región en la que se encuentran zonas subhúmedas secas y semiáridas (UNESCO, 2010; Díaz-Padilla *et al.*, 2011), afectadas por erosión hídrica leve y moderada (INEGI, 2014b) y en la que se presenta desertificación moderada (CONAFOR-UACH, 2013).

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes

3.1.1 Distribución de las tierras secas

Las tierras secas se encuentran en todos los continentes, la mayoría entre los 20° y 35° de latitud, principalmente en África y Asia (FAO, 2007a; UNEMG, 2011; González, 2012; van Oudenhoven *et al.*, 2015). Entre los países que presentan extensiones de estas tierras se encuentran Australia, China, Rusia, Estados Unidos, Brasil, India, Kazajstán (UNEMG, 2011; SEMARNAT, 2013), México y Sudáfrica (UNEMG, 2011). En México, dichas tierras se encuentran principalmente en los desiertos de Sonora y Chihuahua, y en las regiones centrales influenciadas por el efecto de sombra orográfica generada por las Sierras Madre Occidental y Oriental, y parte del Eje Volcánico Transversal (González, 2012; SEMARNAT, 2013; Becerril-Piña *et al.*, 2014; Becerril-Piña *et al.*, 2015). Abarcan aproximadamente 100 millones de hectáreas (UNESCO, 2010; Díaz-Padilla *et al.*, 2011; Granados-Sánchez *et al.*, 2013; SEMARNAT, 2013); entre 65% y 70% de la superficie del país (CONAFOR-UACH, 2013; Granados-Sánchez *et al.*, 2013). De acuerdo con las estimaciones realizadas en diversos estudios, las zonas áridas representan alrededor del 17% del territorio nacional, las semiáridas 30%, y las subhúmedas secas 12% (UNESCO, 2010; Díaz-Padilla *et al.*, 2011; Sánchez *et al.*, 2014). En el estado de Puebla se encuentran zonas húmedas, subhúmedas secas y semiáridas (UNESCO, 2010; Díaz-Padilla *et al.*, 2011),

3.1.2 Desertificación

3.1.2.1 Concepto de desertificación

La desertificación es la degradación de la tierra en regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas, en las que los valores del índice de aridez se encuentran entre 0.05 y 0.65 (López, 2002; Morales, 2005, Abraham *et al.*, 2006; Hori *et al.*, 2011; Steiner y Sörensen, 2011; SEMARNAT, 2013; CINU, 2015; FAO, 2015).

3.1.2.2 Causas de la desertificación

La desertificación es causada principalmente por variaciones climáticas y actividades humanas tales como el cultivo y el pastoreo excesivos, la deforestación y las prácticas inadecuadas de irrigación; acciones que incrementan los procesos de erosión del suelo, la destrucción de la cubierta vegetal y la falta de agua; además de la pobreza, la que puede ser tanto una causa como una consecuencia. Dentro de los factores climáticos destaca la baja humedad del suelo, los patrones de precipitaciones cambiantes, la elevada evaporación, y procesos que llevan a la degradación de la tierra como la pérdida de nutrientes, la pérdida de la capa superficial del suelo debido a la erosión y a la pérdida de vegetación y el incremento de la salinidad y la acidificación del suelo. Los episodios climáticos extremos como las sequías o las riadas también pueden acelerar el proceso (López, 2002; Morales, 2005; Abraham *et al.*, 2006; Hori *et al.*, 2011; Steiner y Sörensen, 2011; SEMARNAT, 2013; Osman, 2014; CINU, 2015; FAO, 2015).

3.1.2.3 Consecuencias de la desertificación

Las consecuencias de la desertificación van desde la reducción en la producción de alimento, infertilidad y salinización del suelo, disminución de la capacidad de recuperación natural de la tierra, contribución al cambio climático, incremento de las inundaciones en las partes bajas del paisaje, escasez y reducida calidad del agua, la sedimentación en cuerpos de agua, el agravamiento de los problemas de salud, alteración de ciclos biogeoquímicos, hasta la pérdida de los medios de subsistencia de las sociedades afectando en especial a los pobres y obligando a las personas afectadas a emigrar (López, 2002; Hori *et al.*, 2011; SEMARNAT, 2013).

3.1.2.4 Distribución de la desertificación

Existen varias estimaciones de la magnitud de la desertificación en las que se calcula que de las zonas secas del mundo entre 70% y 75% están desertificadas (FAO, 2007a; Díaz-Padilla *et al.*, 2011; Granados-Sánchez *et al.*, 2013; SEMARNAT, 2013). En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) considera a la degradación del suelo en las tierras secas un estimador de la desertificación a partir del cual se calcula que este proceso afecta al 43% de dichas tierras lo que equivale a 22.17% del territorio nacional. De éstas 5% son áridas,

61.2% son semiáridas y 33.8% son subhúmedas secas (SEMARNAT, 2013). Sin embargo, de acuerdo a dos estudios, el porcentaje de la superficie afectada por desertificación en estos medios, representa el 59% de la superficie del país (CONAFOR-UACH, 2013; Granados-Sánchez *et al.*, 2013) abarcando 25.7% de esta superficie la clase severa, 6.4% extrema, ligera 13.2% y moderada 13.9%, lo que indica que es prioritario dar atención a todas las áreas de acuerdo al grado de desertificación (CONAFOR-UACH, 2013). En el estado de Puebla se presentan grados de desertificación extrema, severa y moderada (CONAFOR-UACH, 2013).

3.1.2.5 Estudios realizados sobre indicadores de desertificación

Zurlini *et al.* (2014), plantean que una forma potencial de abordar el tema de las señales de alerta de cambios de régimen de los ecosistemas terrestres es observar diferentes patrones actuales de cobertura terrestre para interpretar su conectividad espacial con la ayuda de patrones simulados del paisaje. Así, las señales de alerta pueden derivarse a partir del grado en el que los patrones observados entre escalas difieren de un modelo particular neutro del paisaje. De esta manera, determinaron los patrones de cobertura de la tierra bajo diferentes regímenes en la región de Apulia en el sur de Italia; y observaron que el punto de convergencia representa un valor regional que responde a la conectividad y la composición de la cobertura por lo que éste puede usarse como indicador de alerta de cambios de régimen a diferentes escalas.

Maestre y Escudero (2009) evaluaron, en 29 estepas semiáridas de *Stipa tenacissima* situadas a lo largo de un gradiente latitudinal en España; si las transiciones de la distribución del tamaño de parches caracterizadas por una función de ley de potencias hacia otra descrita por una función de ley de potencias truncadas (TPL) se producen en lugares más degradados. Los resultados indican que una TPL se ajusta mejor que una ley de potencias, a la distribución del tamaño de parches de vegetación perenne en todos los sitios evaluados; además determinaron que las desviaciones de la distribución de tamaño de parches caracterizada por una ley de potencias hacia otra caracterizada por una TPL, no están directamente relacionadas con la desertificación; y que la cubierta vegetal perenne puede utilizarse para monitorear efectivamente variables claves del suelo relacionadas con procesos de desertificación.

Vanmaercke *et al.* (2011) evaluaron la posibilidad de utilizar la producción de sedimentos en cuenca como un indicador de riesgo de desertificación. Concluyeron que la evaluación de la producción de sedimentos a éste nivel, puede dar valor adicional a los estudios de desertificación y que dicha producción usada en combinación con otros indicadores, permite la identificación de otras fuentes de sedimentos además de las consideradas en la escala parcela; por lo

que se considera que la producción de sedimentos es un fuerte indicador complementario de la desertificación que proporciona información valiosa sobre la respuesta de la cuenca a los cambios en los conductores de este proceso.

Salvati *et al.* (2008) sugirieron un conjunto de indicadores para evaluar el riesgo de desertificación en la cuenca mediterránea, con especial énfasis en aspectos demográficos y económicos. Se eligieron 15 indicadores en los que las variables describen aspectos de la demografía, la economía y el contexto de la agricultura. Se concluyó que considerando un mayor número de variables "sociales", como población, industria, agricultura y turismo, en la evaluación cartográfica del riesgo a la desertificación; se puede obtener una nueva perspectiva en la representación de áreas sensibles y vulnerables, indicando también las posibles direcciones tomadas por el fenómeno de la degradación.

3.1.3 Erosión

3.1.3.1 Concepto de erosión

La erosión del suelo es un proceso natural o provocado por la actividad humana de pérdidas de la capa superficial, que ocurre debido al desprendimiento de partículas del suelo, su transporte y deposición en otro lugar (SEMARNAT, 2010; FAO, 2015; Osman, 2014; SSSA, 2015).

3.1.3.2 Causas de la erosión

La acción de agentes naturales tales como el agua, viento, hielo y la gravedad desgastan, separan y remueven las partículas de suelo de su posición original y las depositan en otro lugar. Las acciones humanas para la explotación de los recursos tales como la deforestación, el sobrepastoreo, el cultivo excesivo, el monocultivo continuo, y la compactación del suelo por el ganado y la maquinaria; aceleran la extensión e intensidad de la erosión (SEMARNAT, 2010; FAO, 2015; Osman, 2014; SSSA, 2015). Asimismo, factores como la pendiente de las tierras, la ausencia de vegetación, el bajo contenido de humedad de los suelos, la alta evaporación potencial y el bajo contenido de materia orgánica en éstos, influyen en el proceso y aumentan la vulnerabilidad del suelo a la erosión (SEMARNAT, 2010; Osman, 2014).

3.1.3.3 Consecuencias de la erosión

Los efectos de la erosión causada por los diversos agentes incluyen; pérdida de suelo superficial, deformación del terreno, pérdida de materia orgánica y de nutrientes, disminución de la calidad, fertilidad y productividad del suelo; reducción en el rendimiento y crecimiento de los cultivos, la disminución de las posibilidades de comercialización de éstos; exposición de las raíces de las plantas y el incremento de éstas a ciertos tipos de estrés, la reducción de la vegetación, encostramiento y compactación del suelo haciendo que las operaciones de

labranza se dificulten; y reducción en la capacidad de las funciones de los ecosistemas. Otros de los efectos derivados de este proceso incluyen la sedimentación en las partes bajas del paisaje, inundaciones, la eutrofización de cuerpos de agua, y la contaminación y disminución de la calidad de ésta (SEMARNAT, 2010; Osman, 2014).

3.1.3.4 Distribución de la erosión

En México, la erosión hídrica afecta al 11.9% del territorio nacional (SEMARNAT, 2010; SEMARNAT, 2013) y la eólica al 9.5% (SEMARNAT, 2013). De la superficie nacional con erosión hídrica, 56.4% se encuentra en el nivel ligero, 39.7% en el nivel moderado, 3.7% en el fuerte y 0.2% extremo. En cuanto a la erosión eólica, ésta afecta principalmente a las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas del país (SEMARNAT, 2010; SEMARNAT, 2013). De la superficie nacional afectada 66.7% se encuentra en nivel moderado, 29.5% en ligero, 3.8% en fuerte y 0.1% extremo (SEMARNAT, 2013). En el estado de Puebla, 10.1% de la superficie se encuentra afectada por la erosión hídrica, presentando en mayor proporción niveles ligero y moderado y en menor proporción nivel fuerte. La región central del estado muestra nivel ligero, moderado y regiones sin degradación aparente. Respecto a la erosión eólica, la superficie estatal afectada abarca 9.6% del territorio, y se presentan niveles ligero y moderado de ésta. La región central del estado muestra nivel ligero y regiones sin degradación aparente (SEMARNAT, 2010; SEMARNAT, 2013).

3.1.3.5 Estudios realizados sobre indicadores de erosión

Rostagno y Degorgue (2011) analizaron la relación entre la erosión del suelo y la formación de pavimento desértico en tres posiciones topográficas a lo largo del costado de un pedimento en pastizales semiáridos de la Patagonia noreste. Utilizaron la cubierta superficial de grava y su masa, así como el espesor del horizonte A remanente como medidas de la erosión del suelo. La fuerte correlación entre la masa de la grava superficial y el espesor del horizonte A remanente indicó que la acelerada erosión del suelo ha jugado un papel importante en la formación de pavimentos desérticos, y que éstos últimos son buenos indicadores de la extensión e intensidad del proceso de erosión en el área estudiada.

Chartier *et al.* (2009), determinaron la tasa de erosión del suelo a partir de las raíces expuestas del arbusto enano *Margyricarpus pinnatus* (Lam.) Kuntze en dos sitios en los pastizales del noreste de la Patagonia. Los resultados demuestran que la tasa local de erosión del suelo a corto plazo, puede ser determinada con una precisión aceptable a partir de las raíces expuestas de *M. pinnatus*; confirman la utilidad e importancia de los estudios dendrogeomorfológicos con respecto a la erosión del suelo, y que la medición de la reducción del suelo con respecto a las raíces expuestas representa un método favorable para la estimación de la erosión; por lo

que este enfoque puede ser particularmente útil para monitorear los efectos de las prácticas de manejo de la tierra en la erosión del suelo y se puede utilizar como indicador de la erosión.

3.1.4 Indicador

3.1.4.1 Concepto de indicador

Un indicador se define como un parámetro es decir una propiedad que es medida u observada, y que provee información y una descripción simplificada del estado y tendencia de un fenómeno o proceso (Brandt y Geeson; Abraham *et al.*, 2006; Sommer *et al.*, 2011; Vanmaercke *et al.*, 2011; Becerril-Piña *et al.*, 2015) para hacer cuantificables los fenómenos complejos, de modo que la información pueda ser comunicada (Brandt y Geeson; Abraham *et al.*, 2006; Sommer *et al.*, 2011).

3.1.4.2 Características de un indicador

Los indicadores deben ser claros, específicos, relevantes, útiles, fáciles de usar, confiables, sensibles a factores de estrés, fáciles de cuantificar e interpretar y rentables (Brandt y Geeson; Yang *et al.*, 2005; Sommer *et al.*, 2011; Vanmaercke *et al.*, 2011).

3.1.5 Tipo de investigación

La investigación es de tipo exploratorio con elementos de carácter descriptivo y explicativo ya que se busca determinar las características del suelo adecuadas para su uso como indicadores, mediante el análisis de dichas variables. Posteriormente examinar los resultados obtenidos, y adquirir información que lleve a considerar emplearlas como indicadores para la alerta de la erosión y desertificación, exponiendo las posibles relaciones (Hernández *et al.*, 2010).

IV. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

4.1 Pregunta de investigación

¿Qué variables edáficas se pueden emplear como indicadores para la alerta de la erosión y la desertificación?

V. HIPÓTESIS

5.1 Hipótesis general

Las transformaciones que sufren las variables morfológicas, físicas, químicas y biológicas del suelo provocadas por procesos erosivos pueden ser empleadas como indicadores edáficos para la alerta de la erosión y la desertificación.

VI. OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

Proponer un conjunto de variables edáficas que puedan utilizarse como indicadores para la alerta de procesos erosivos y de desertificación al sur del municipio de Puebla.

6.2 Objetivos específicos

- Evaluar en suelos con diferente grado de erosión; características morfológicas, físicas, químicas y biológicas susceptibles de sufrir transformaciones por la acción de procesos erosivos en zonas secas.
- Seleccionar las variables susceptibles o factibles de ser empleadas como indicadores de erosión y desertificación.

VII. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se dividió en tres fases; de gabinete, de campo y de laboratorio (Figura 1). A continuación, se presenta la localización de la zona de estudio y posteriormente la descripción de las fases que comprenden este trabajo.

7.1. Localización de la zona de estudio

La zona de estudio se localiza al sur de la ciudad de Puebla, en el municipio del mismo nombre; en el área que comprende a la Junta Auxiliar de Santa María Guadalupe Tecola, y las inspectorías de La Paz Tlaxcolpan y San José el Rincón (INAFED, 2010), próximas a la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo) (Figura 2) (INEGI, 2014a).

7.1.1 Ubicación. Santa María Guadalupe Tecola se ubica en las coordenadas geográficas 18° 54' 20" N y 98° 11' 31" O; a una altitud de 2060 msnm y su población es de 1,414 habitantes aproximadamente. La Paz Tlaxcolpan se sitúa en las coordenadas geográficas 18° 54' 07" N y 98° 13' 20" O; a una altitud de 2075 msnm y su población es de 745 habitantes. San José el Rincón se encuentra en las coordenadas geográficas 18° 53' 09" N y 98° 11' 57" O; a una altitud de 2060 msnm y su población es de 929 habitantes aproximadamente (CONEVAL, 2010; CONAPO, 2012; SEDESOL, 2013; INEGI, 2016a; INEGI, 2016b).

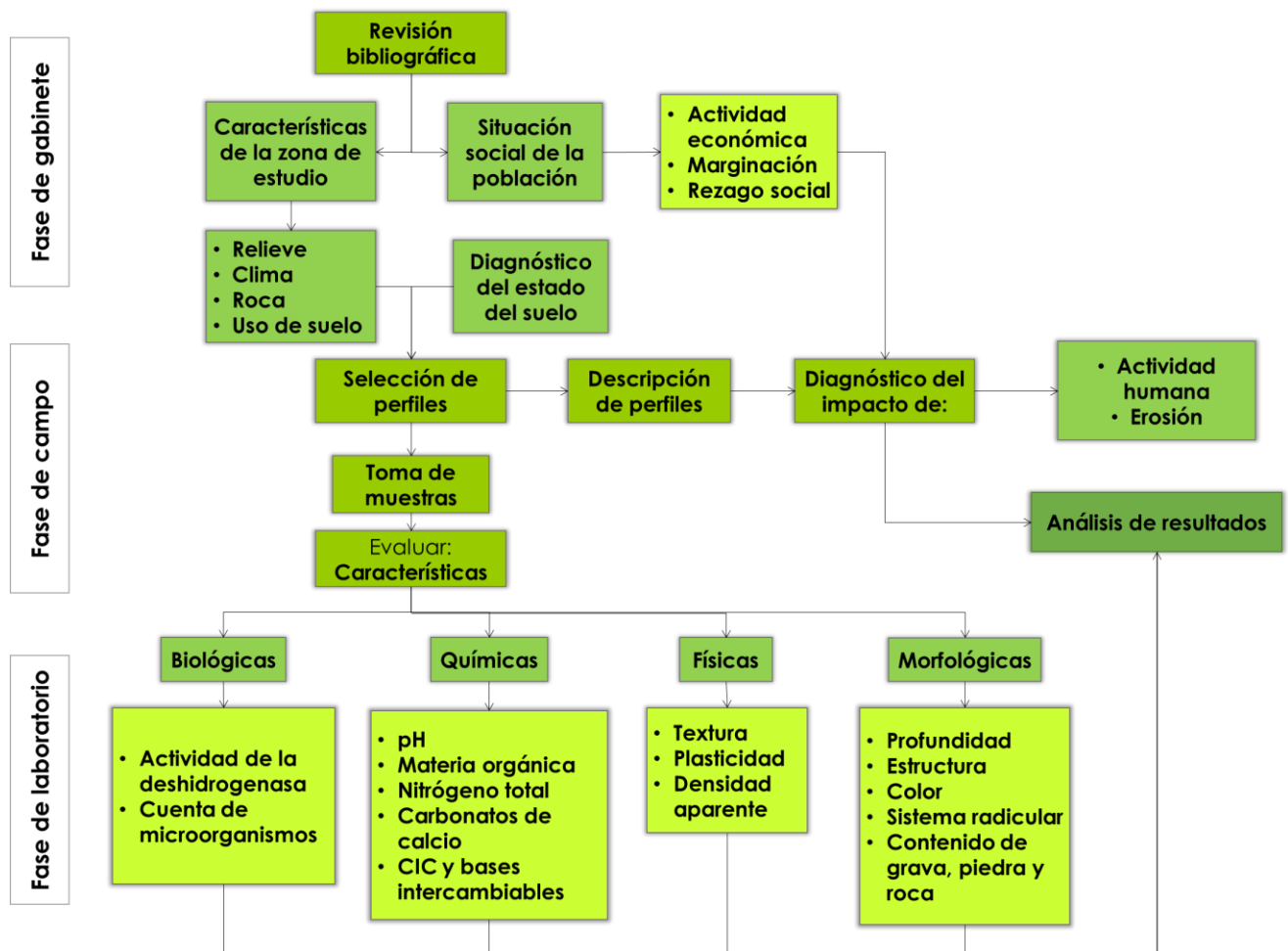


Figura 1. Diagrama del diseño de la investigación.

7.2 Fase de gabinete

La fase de gabinete consistió en la revisión de las características socioambientales de la zona de estudio con el fin de conocer la situación social de la población, a través del conocimiento de las principales actividades económicas que desarrollan, y el grado de marginación y rezago social de las localidades; y de esta manera comprender los efectos de las actividades antropogénicas en el ambiente; así como las posibles consecuencias del deterioro del mismo. Asimismo, la investigación se basó en la evaluación de las variaciones o cambios de las características morfológicas, físicas, químicas y biológicas de suelos con diversos niveles de erosión; pero bajo condiciones climáticas, de paisaje y uso de suelo similares. Por lo tanto, se requirió conocer el tipo de relieve, clima, roca, tipo de suelo, uso del mismo e hidrografía de la región, con el propósito de seleccionar los perfiles en puntos de características similares y en una región bajo condiciones de sequía.

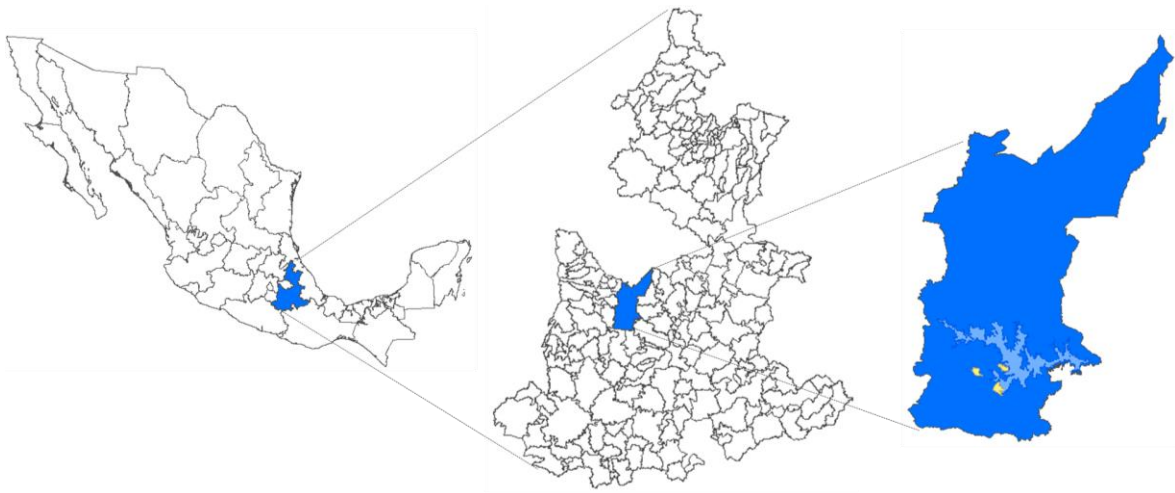


Figura 2. Zona de estudio, sur del municipio de Puebla.

7.3 Fase de campo

7.3.1 Selección, descripción y muestreo de suelos

La fase de campo consistió en la selección y descripción de los perfiles de suelo, toma de muestras y diagnóstico del impacto de la actividad humana, y de la erosión (Figura 1). La selección de los perfiles se realizó en base al uso del suelo, el relieve, clima y tipo de roca. La descripción de los mismos se llevó a cabo en base al Manual para la descripción de perfiles de suelos y evaluación del entorno de Ruíz *et al.* (1999). La toma de muestras se efectuó de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. El diagnóstico del impacto de la actividad humana, y de la erosión se realizó en base a la descripción previa de los perfiles y de acuerdo a la Guía simplificada de evaluación del suelo y manejo sostenible de la tierra para una agricultura en laderas de Saavedra (2014); y al Manual para la recolección integrada de datos de campo de FAO (2009b); Manual de Evaluación Local de la Degradación de Tierras Áridas (LADA-L) de FAO (2007b) y al Manual elaborado por Ruíz *et al.* (1999); mencionado anteriormente. A partir de la descripción de los perfiles se determinaron las características morfológicas.

7.3.2 Muestreos de campo

Una vez seleccionados los perfiles del suelo, se tomaron de cada uno tantas muestras como horizontes presentaban los perfiles. Cada muestra se colectó de aproximadamente 1 kg de peso seco; y se registraron las mismas conteniendo los datos de lugar, número de perfil, profundidad y fecha de muestreo (SEMARNAT, 2002).

7.3.3 Estimación de la erosión del suelo y del almacenamiento de carbono

Como parte del diagnóstico del impacto de la actividad humana y de la erosión; y a manera de medición cuantitativa de ésta última, se realizó la estimación de la pérdida de suelo y del almacenamiento de carbono.

7.3.3.1 Estimación de la erosión del suelo.

El estado de degradación en que se encuentran los suelos de uso agropecuario y forestal se puede estimar por medio de las pérdidas de suelo que ocurren en los terrenos. De este modo es posible determinar si el uso que se le está dando a los suelos es el correcto (SAGARPA, 2005). Cuando la tasa de erosión es mayor que la tasa de formación del suelo es señal de que el manejo que se le está dando, está originando su degradación; haciendo necesario realizar prácticas y obras de conservación (SAGARPA, 2005).

Para estimar la erosión de los suelos, se propone en (SAGARPA, 2005) la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), un modelo que permite estimar en campo, la erosión actual y potencial de los suelos; y el que ha sido simplificado y adecuado para utilizarse en México. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$E = R K L S C P$$

Donde:

E= Erosión del suelo (t/ha/año)

R= Erosividad de la lluvia (Mj/ha mm/h)

K= Erodabilidad del suelo

LS= Longitud y Grado de pendiente

C= Factor de vegetación

P= Factor de prácticas mecánicas

7.3.3.2 Estimación del almacenamiento de carbono en el suelo

El carbono del suelo tiene una correlación directa con la calidad del mismo y es un determinante importante de la capacidad de éste para retener y liberar agua y otros nutrientes que son esenciales para que crezcan las plantas y sus sistemas radiculares. El secuestro de carbono, el proceso mediante el cual el dióxido de carbono (CO₂) atmosférico es tomado por las plantas a través de la fotosíntesis y almacenado como carbono en la biomasa y los suelos, puede ayudar a revertir la

pérdida de fertilidad de éstos, limitar las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera y reducir el impacto del cambio climático en los ecosistemas agrícolas.

El almacenamiento de carbono orgánico en los suelos depende de dos variables importantes; la concentración de carbono orgánico en el suelo y la densidad aparente. El contenido de carbono orgánico en suelos se calcula con base en las dos variables anteriores mediante la siguiente ecuación (Andrade e Ibrahim, 2003):

$$COS = \%CO \times da \times Ps$$

Donde:

COS: carbono orgánico de suelos (kg/m²)

%CO: concentración de carbono orgánico en suelos (%)

DA: densidad aparente (g/cm³)

Ps: profundidad del suelo (cm)

7.4 Fase de laboratorio

La fase de laboratorio consistió en el procesamiento de las muestras, y el análisis físico, químico y biológico de éstas. El procesamiento de las muestras de suelo se realizó secándolas al ambiente, para lo cual se extendieron éstas sobre una superficie que no las contaminara, logrando una profundidad inferior a 2.5 cm; y en un lugar protegido y techado. Se retiraron las rocas y el material orgánico visible, y se molieron las muestras. El suelo molido se pasó por un tamiz de abertura 2mm (malla 10) de acero inoxidable. El material tamizado se almacenó para emplearse en las determinaciones analíticas (SEMARNAT, 2002).

7.4.1 Características del suelo a evaluar

Las características del suelo a evaluar se clasifican en morfológicas, físicas, químicas y biológicas. Para este trabajo se consideraron las siguientes:

7.4.1.1 Características morfológicas

7.4.1.1.1 Profundidad. La profundidad del suelo se define como el espesor del perfil del mismo, de la superficie de éste a la parte superior del regolito o material parental no meteorizado (European Commission, 1999). Ésta es uno de los elementos del perfil que determina qué cultivo puede sustentar el suelo (Ruíz *et al.*, 1999). Asimismo, los límites de los horizontes proveen información de los procesos dominantes formadores del suelo y se pueden describir, entre otros factores, en términos de profundidad (FAO, 2009a). Se mide desde la superficie, incluyendo

cobertura orgánica y mineral, hacia abajo; reportándose en centímetros (FAO, 2009a); y a partir de ésta el suelo se clasifica en cuatro clases; profundo (>75 cm), moderado (75-30 cm), poco profundo (15-30 cm) y muy poco profundo (<15 cm) (European Commission, 1999).

7.4.1.1.2 Estructura. La estructura del suelo es la forma en que se arreglan o acomodan las partículas, formando unidades de mayor tamaño llamadas agregados, unidades estructurales o peds (Ruíz *et al.*, 1999; Jaramillo, 2002; FAO, 2009a). A través de su determinación se pueden obtener conclusiones preliminares del estado físico, la fertilidad, las características agroproductivas del suelo y su grado de erosión (Ruíz *et al.*, 1999). Para la descripción de la estructura se debe tomar un terrón de suelo, de varias partes del horizonte si es necesario; y se describe en términos de grado, tamaño y tipo de agregados. Si un horizonte contiene agregados de más de una de estas categorías, los diferentes tipos se deben describir por separado e indicar sus relaciones (FAO, 2009a).

7.4.1.1.3 Color. El color del suelo es una característica morfológica que guarda una estrecha relación con los principales componentes sólidos de éste. Está determinado generalmente por el revestimiento de partículas muy finas de humus (oscuro), óxidos de hierro (amarillo, pardo, anaranjado y rojo), óxidos de manganeso (negro) y otros, o por el color del material parental (Jaramillo, 2002; FAO, 2009a). Su determinación se realiza utilizando la tabla Munsell de colores del suelo (Munsell Color, 1994); mediante la comparación del color observado en el suelo tanto en seco como en húmedo respecto al registrado en las tarjetas de color, en las que se especifican los parámetros de matiz (Hue), brillo (Value) e intensidad (Chroma) (SEMARNAT, 2002).

7.4.1.1.4 Sistema radicular. El sistema radicular es un indicador del estado de agregación y fertilidad del suelo en diferentes profundidades del perfil. Su definición se basa en la descripción del grosor y el grado de desarrollo alcanzado por las raíces (Ruíz *et al.*, 1999; FAO, 2007b); y su registro para caracterizar la distribución de éstas en el perfil de suelo. En casos específicos, también se anota información adicional como cambios bruscos en la orientación de la raíz (FAO, 2009a), cantidad y densidad desproporcionadas de éstas en la capa superficial, evidencia de raíces "atrapadas" entre unidades de suelo firmes, y ausencia de pelos en las raíces, o exceso de raíces primarias fuertes (FAO, 2007b).

7.4.1.1.5 Contenido en gravas, piedras y rocas. La presencia de fragmentos del material de origen y de otras rocas en el perfil se debe a factores como la resistencia de éstos a la transformación, la edad del material expuesto a la acción de agentes naturales, el rejuvenecimiento del relieve y el grado de erosión del suelo (Ruíz *et al.*, 1999); reflejando, el contenido de éstos, el origen y estado de desarrollo

del suelo e influenciando el uso y manejo del mismo; así como el movimiento del agua en éste (Ruíz *et al.*, 1999; FAO, 2009a). Estos cuerpos se clasifican de acuerdo a su tamaño en gravas (<7 cm), piedras (7-25 cm), y rocas (> 25cm). La determinación se realiza en función del porcentaje de cada fragmento en el horizonte (Ruíz *et al.*, 1999).

7.4.1.2 Características físicas

7.4.1.2.1 Textura. Es aquella característica que establece las cantidades relativas en que se encuentran las partículas de diámetro menor a 2 mm (Jaramillo, 2002; FAO, 2009a); agrupadas en las clases arena gruesa (2-0.2 mm), arena fina (0.2-0.02 mm), limo (0.02-0.002 mm) y arcilla (<0.002 mm) (Ruíz *et al.*, 1999; Jaramillo, 2002; FAO, 2009a). La textura es fuertemente dependiente del material parental del suelo (Jaramillo, 2002), proporciona una idea general de las propiedades físicas del mismo (SEMARNAT, 2002); tiene especial significado en la aireación, el movimiento del agua, la retención de humedad, la disponibilidad de nutrientes y con ello en la productividad, erodabilidad, uso y manejo del suelo (Jaramillo, 2002). La clase textural se determina en campo, por medio del tacto, al friccionar entre los dedos la masa de suelo previamente humedecida. En laboratorio la determinación se fundamenta en la sedimentación de una muestra de suelo en un medio líquido durante un determinado tiempo, al cabo del cual se cuantifica la cantidad de partículas de un determinado tamaño que hay en suspensión (Jaramillo, 2002); y se realiza por el procedimiento de Bouyoucos en el que se elimina la agregación debida a la materia orgánica y la floculación debida a los cationes calcio y magnesio; y se establece un tiempo de lectura de 40 segundos para la separación de partículas mayores de 0.05 mm y de 2 horas para partículas de diámetro mayor a 0.002 mm (SEMARNAT, 2002).

7.4.1.2.2 Plasticidad. La plasticidad es la habilidad del material del suelo a cambiar de forma bajo la influencia de una presión aplicada y conservar esa forma cuando se quita esa presión (FAO, 2009a). Se relaciona con el contenido de humedad del suelo, el grado de agregación de las partículas, el contenido y tipo de arcillas (Ruíz *et al.*, 1999; Jaramillo, 2002.). La determinación se basa en la capacidad de moldeado de la masa húmeda del suelo (Ruíz *et al.*, 1999; FAO, 2009a) y se realiza enrollando ésta en las manos hasta formar un cordón. Dependiendo de si el cordón se forma o no, si éste se rompe inmediatamente o al doblarlo, o si se puede doblar en forma de aro (FAO, 2009a); la clasificación del suelo puede ser no plástico, ligeramente plástico, plástico y muy plástico (Jaramillo, 2002; FAO, 2009a).

7.4.1.2.3 Densidad aparente. La densidad aparente del suelo se define como la masa de una unidad de volumen de suelo seco; teniendo en cuenta el espacio ocupado por los poros al cuantificar el volumen de la muestra de éste (Jaramillo,

2002; FAO, 2009a). La densidad aparente refleja la porosidad total del mismo y es un parámetro importante para la descripción de la calidad del suelo y la función del ecosistema (FAO, 2009a). La determinación se realiza por el método de la probeta; en la que ésta es previamente pesada y posteriormente se rellena con la muestra de suelo hasta el volumen total, compactando el suelo con ligeros golpes para que quede totalmente llena. Se pesa la probeta conteniendo el suelo y se calcula la densidad aparente a partir del conocimiento de la masa del suelo y el volumen total ocupado por ésta.

7.4.1.3 Características químicas

7.4.1.3.1 Reacción del suelo. La reacción del suelo es aquella propiedad que establece el grado de acidez o de alcalinidad que presenta éste. Se evalúa al determinar el pH del mismo (Jaramillo, 2002); el que expresa la actividad de los iones hidrógeno (H^+) en la solución del suelo (SEMARNAT, 2002; Fernández *et al.*, 2006; FAO, 2009a). Tiene gran influencia en muchas de sus propiedades físicas, químicas y biológicas; y afecta la disponibilidad de nutrientes minerales para las plantas, así como a muchos procesos del suelo (Jaramillo, 2002; SEMARNAT, 2002; Fernández *et al.*, 2006; FAO, 2009a). La determinación se realiza en la suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo:agua 1:2, empleando un electrodo cuya membrana es sensitiva al ion hidrógeno (SEMARNAT, 2002).

7.4.1.3.2 Materia orgánica. La materia orgánica del suelo se define como la fracción orgánica del mismo, que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición; y los subproductos del desarrollo y descomposición microbiana (López, 2002; Fernández *et al.*, 2006; FAO, 2009a). La materia orgánica tiene efectos marcados en diversas propiedades del suelo (Jaramillo, 2002; López, 2002) y los cambios en ésta son un índice importante de la degradación del mismo (Yang *et al.*, 2015). La determinación del contenido de materia orgánica se realiza por el método de Walkley y Black, basado en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado. Después de cierto tiempo de espera, se diluye la mezcla y se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de Fe^{3+} , y el dicromato de potasio residual se valora con sulfato ferroso (SEMARNAT, 2002).

7.4.1.3.3 Carbonatos de calcio. Los carbonatos son minerales cuya composición química corresponde a sales derivadas del ácido carbónico, H_2CO_3 (Jaramillo, 2002). Los carbonatos de metales alcalinotérreos que se encuentran en cantidades notables en el suelo provienen de la calcita ($CaCO_3$) y la dolomita ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$) principalmente (Jaramillo, 2002; SEMARNAT, 2002). Debido a la baja precipitación en regiones áridas y semiáridas casi siempre se encuentran formando parte de la

fase sólida del suelo. El contenido alto de los mismos puede inducir deficiencias de fósforo, zinc, hierro y/o manganeso en los cultivos. La determinación se lleva a cabo por el método de neutralización ácida, siguiendo el método de titulación rápida por Piper; en el que la muestra es tratada con ácido clorhídrico diluido y el ácido restante, no usado por el carbonato, se titula con hidróxido de sodio (SEMARNAT, 2002).

7.4.1.3.4 Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiables. La CIC es la medida de la capacidad que posee un suelo de retener cationes y es equivalente a la carga negativa de éste. Esta propiedad es la que define la cantidad de sitios disponibles para almacenar los cationes en el suelo y se relaciona con su fertilidad. (Jaramillo, 2002; Fernández *et al.*, 2006). A partir de la misma, es posible inferir acerca del tipo de arcilla presente, de la magnitud de la reserva nutrimental y del grado de intemperismo de los suelos (SEMARNAT, 2002). Los cationes más importantes en los procesos de intercambio catiónico, por las cantidades de ellos que participan en dichos procesos, son calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y sodio (Na^+) (Jaramillo, 2002; Fernández, *et al.*, 2006). La determinación se realiza a través del método con acetato de amonio; en el que se satura la superficie de intercambio con un catión índice, el ion amonio; se lava el exceso de saturante con alcohol; posteriormente se desplaza el catión índice con sodio y se determina el amonio mediante destilación. Las bases intercambiables se determinan a partir del sobrenadante obtenido de la saturación del suelo con acetato de amonio, por espectrofotometría de absorción atómica (SEMARNAT, 2002).

7.4.1.3.5 Nitrógeno total. El nitrógeno es un elemento indispensable para la vida, forma parte de las principales biomoléculas de todos los seres vivos. Es también uno de los elementos más abundantes de la Tierra, pues en su forma gaseosa (N_2) constituye 78% de la atmósfera. Sin embargo, la cantidad de nitrógeno presente en muchos suelos es escasa, debido a su propia dinámica y a su ciclo biogeoquímico. El nitrógeno puede llegar al suelo gracias a los aportes de materia orgánica y a la fijación bacteriana a partir del aire. Dentro del suelo es aprovechado por las plantas, animales y microorganismos que lo incorporan a sus tejidos. En los microorganismos la carencia de nitrógeno puede afectar el crecimiento, por lo que la población microbiana no tendrá un desarrollo óptimo (Fernández, *et al.*, 2006). La determinación se realiza con el método Micro-Kjeldahl que comprende tres fases; la digestión de la muestra de suelo por calentamiento con ácido sulfúrico y una mezcla de sales que aceleran y facilitan tanto la oxidación de la materia orgánica como la conversión de todas las formas de nitrógeno orgánico a mineral. La destilación con hidróxido de sodio; y la valoración

del amoníaco desprendido por la reacción se titula con ácido sulfúrico (SEMARNAT, 2002; Fernández, *et al.*, 2006).

7.4.1.4 Características biológicas

7.4.1.4.1 Actividad de la deshidrogenasa. La oxidación biológica de compuestos orgánicos se realiza generalmente mediante procesos de deshidrogenación y se lleva a cabo por enzimas denominadas deshidrogenasas. Los sistemas de deshidrogenasas son parte integral de los microorganismos (Barajas, 2008), por lo que la medida de su actividad ha sido utilizada como un indicador de la actividad microbiana del suelo (Barajas, 2008; Montejo *et al.*, 2012); la que se ha usado para evaluar suelos degradados (Barajas, 2008). La determinación se lleva a cabo por el método de Casida; el que se basa en la suposición de que en ausencia de O₂, el cloruro de 2, 3, 5-trifeniltetrazolium (TTC) actúa cuantitativamente como aceptor terminal de electrones para el sistema deshidrogenasa con la formación del rojo de trifeniltetrazoliumformazan (TTF). Cuando esta prueba se aplica a suelos, las condiciones son hechas anaeróbicas, tanto para la deshidrogenasa anaeróbica como para la aeróbica y se asume que usan el TTC como aceptor de hidrógeno (Barajas, 2008; Montejo *et al.*, 2012); y si se quiere conocer si la actividad de la enzima está limitada, por déficit de compuestos orgánicos en el suelo, se adiciona una fuente de carbohidrato simple (glucosa). Para esto, a las muestras de suelo pesadas por sextuplicado, se les añade carbonato de calcio y dos de éstas se esterilizan para desnaturalizar la enzima que se encuentre en el suelo, así como eliminar los microorganismos productores. A un trío de muestras (una pesada estéril y dos sin esterilizar) se les añade agua y TTC, y al restante se le añade solución de glucosa y TTC. Los frascos que contienen las muestras se cubren con papel aluminio, ya que el TTC y el TTF se alteran con la luz directa; y se incuban durante 22 horas, se les añade alcohol etílico, se agitan y se colocan de nuevo en la incubadora por 2 horas más. Transcurrido este tiempo, se filtran las muestras y se lee el filtrado en el espectrofotómetro UV-VIS.

7.4.1.4.2 Cuenta de microorganismos. La composición de organismos del suelo determina la influencia de las comunidades microbianas de éste, en los conjuntos de plantas; ya que la biota del suelo puede afectar el establecimiento y la abundancia de las especies de plantas, así como su diversidad (Klass *et al.*, 2012). El conteo de poblaciones microbianas se realiza por el método de dilución en placa; que se fundamenta en que cualquier célula viable inoculada en un medio de cultivo se multiplica y produce datos de fácil identificación, como la formación de colonias en placas de agar. Este método consiste en la preparación de una serie de diluciones de una muestra de suelo en un diluyente apropiado, esparciendo una alícuota de una dilución sobre la superficie de un medio de cultivo sólido e incubando la placa de agar bajo condiciones ambientales

apropiadas (Fernández *et al.*, 2006). Las diluciones se efectúan en agua, previamente esterilizada junto con el material. El conteo de bacterias mesófilas aerobias, actinomicetos, Gram negativas y hongos se realizó; en los medios de cultivo Agar Triptona Soya, Agar Czapek, Agar Mac Conkey y Agar de papa y dextrosa, respectivamente.

7.5 Análisis de resultados

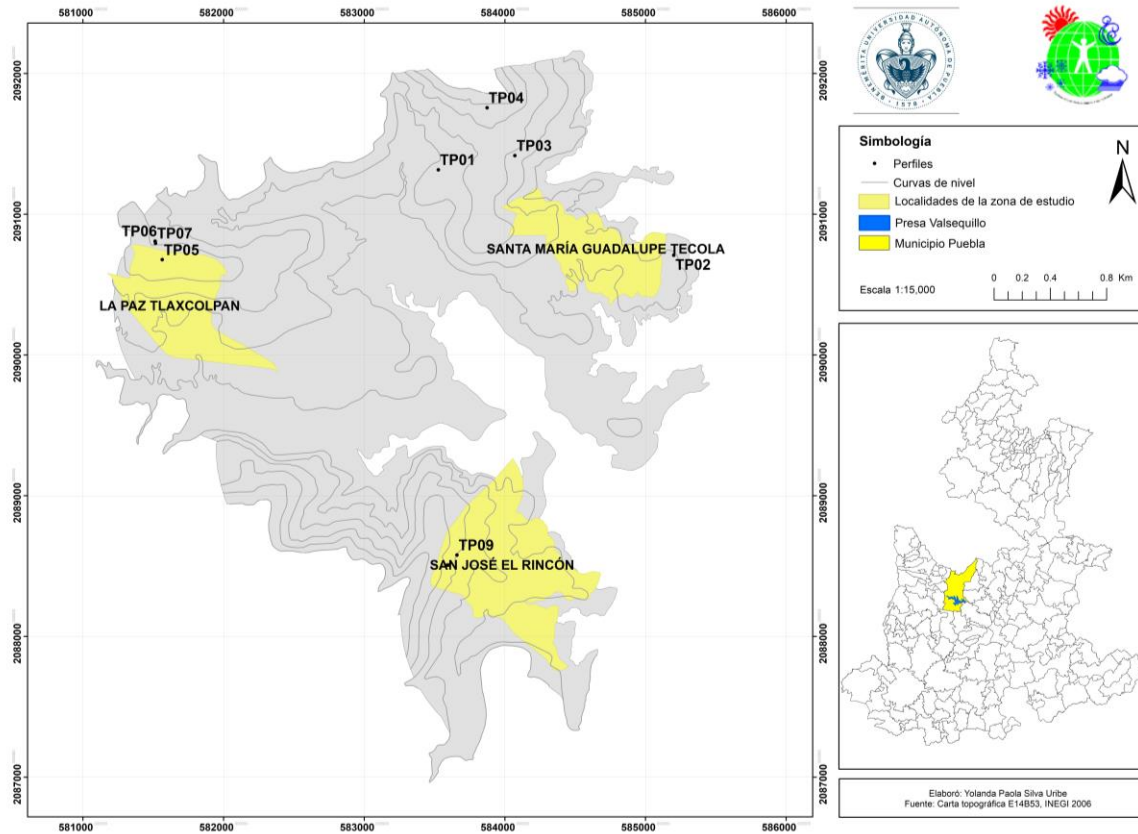
El análisis de resultados consistió en el análisis de correlación de las características edáficas evaluadas en cada horizonte, con respecto al grado de erosión de los perfiles; con el fin de determinar si las transformaciones que sufren dichas variables se relacionan con la pérdida de suelo. Las características biológicas se evaluaron en los primeros 30 cm de profundidad, a diferencia del resto de las características que fueron evaluadas en cada horizonte. Por lo tanto, en este caso se realizó el análisis de varianza de un factor; con el fin de determinar si las medias de los valores de los distintos parámetros evaluados en cada perfil difieren entre ellas, pues el grado de erosión de los perfiles varía. Para realizar estos análisis se utilizó el programa RCommander 3.2.3.

VIII. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio de los suelos se realizó mediante la selección de contornos, es decir, regiones bajo características similares de clima, uso de suelo, material parental y relieve, dentro de las cuales se eligieron perfiles de suelos conservados y sus similares, con diferentes grados de erosión; ya que esto permite determinar el grado de conservación y/o deterioro de los mismos en condiciones similares para poder alertar sobre las transformaciones que se producen en el suelo. A partir de este diagnóstico se pueden proponer estrategias, que tenga en cuenta las condiciones actuales de cada sitio; para disminuir el daño ocasionado y preservar el suelo que aún conserva sus propiedades agro-productivas intactas o poco alteradas.

Se estudiaron tres contornos correspondientes a tres localidades; donde se describieron diez perfiles de suelos y se evaluó el entorno. En la Figura 3 se muestra la localización de dichos perfiles. A continuación, se presentan los resultados de la fase de gabinete, es decir, las características socioambientales de la zona de estudio; seguida de la fase de campo, que consiste en la caracterización de los perfiles, el diagnóstico del grado de erosión, y del impacto de la actividad humana en el entorno. Posteriormente se muestran los resultados de la fase de laboratorio, es decir los valores obtenidos de la evaluación de las características morfológicas, físicas, químicas y biológicas. A continuación, se presentan los resultados de la estimación de la erosión del suelo y del almacenamiento del carbono, ya que para

obtenerlos se emplearon datos obtenidos en la fase de campo y de laboratorio. Por último, se presenta el análisis de resultados que consistió en análisis estadístico para determinar qué variables edáficas muestran correlación con la erosión del suelo en zonas secas.



TP01, TP02, TP03 y TP04 perfiles en Santa María Guadalupe Tecola. TP05, TP06 y TP07 perfiles en La Paz Tlaxcolpan. TP08, TP09 y TP10 perfiles en San José el Rincón.

Figura 3. Ubicación de los perfiles en el área de estudio.

8.1 Resultados fase de gabinete

En esta fase se ilustran las condiciones socioambientales de la zona de estudio.

8.1.1 Clima: Los componentes climáticos que mayor incidencia tienen en la evolución del suelo son la precipitación y la temperatura. Por ejemplo, al incrementarse la temperatura, los contenidos de materia orgánica y de nitrógeno disminuyen; y en el caso de las precipitaciones, al aumentar éstas, la profundidad a la cual se acumulan los carbonatos se incrementa (Jaramillo, 2002). En la zona de estudio, el clima es templado subhúmedo y se presentan lluvias en verano (Figura 4). Asimismo, la temperatura media anual se encuentra entre los 16 y 18°C.

Respecto a la precipitación media anual, ésta es de 800 mm (INEGI, 2009; SEDESOL, 2013; INEGI, 2014a; INEGI, 2016a).

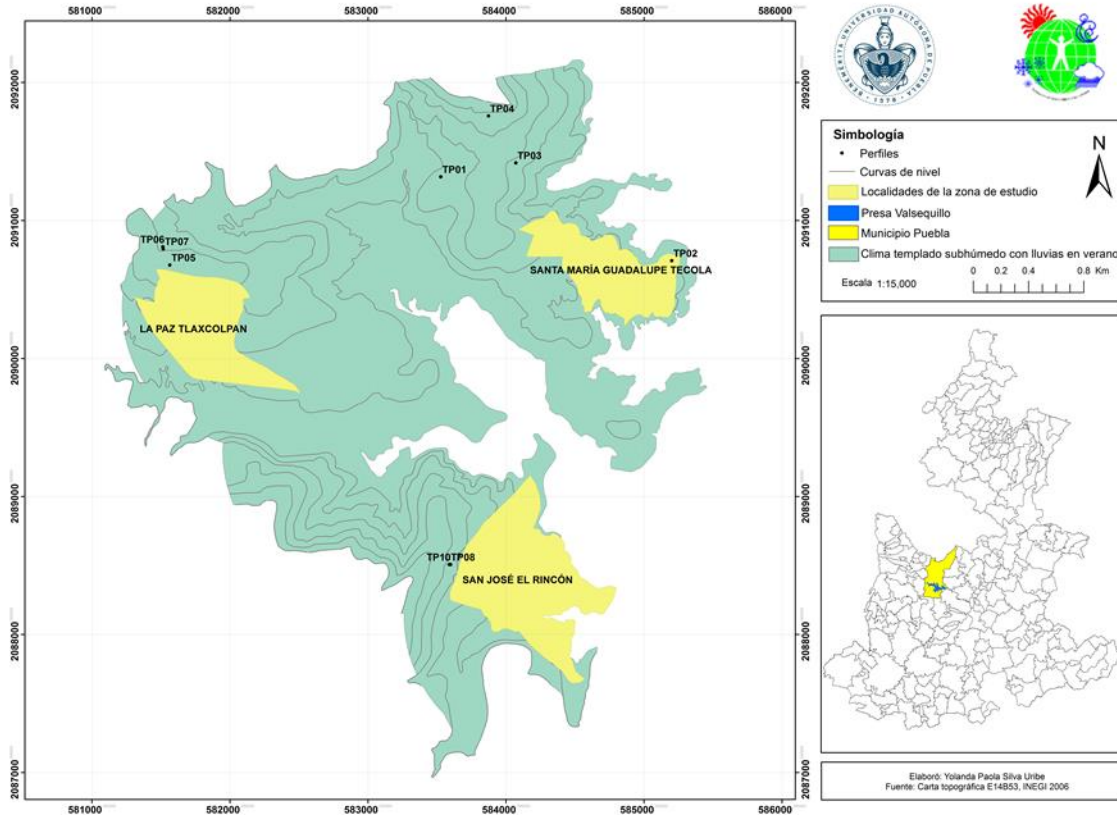


Figura 4. Mapa climático de la zona de estudio.

En base a la información obtenida para el periodo 1951-2010 de las cuatro estaciones climatológicas más cercanas a la zona de estudio, ubicadas al este de la misma (estación 00021164 San Juan Tetla, latitud 19°12'55" N longitud 98°30'08" O; estación: 00021214 San Juan Tetla Siete Norte, latitud 19°10'26" N longitud 98°34'50" O; estación 00021016 Balcon Diablo A. Texaluca, latitud 18°53'51" N longitud 98°07'56" O y estación 00021071 San Baltazar Tetela, Dge. latitud 18°54'16" N longitud 98°10'14" O) (SMN, 2017), se construyeron los respectivos climogramas (Figura 5), en los que se observa un incremento en las precipitaciones entre los meses de junio y septiembre, es decir en verano; sin embargo, en todos los casos las precipitaciones son menores a 800 mm. Asimismo se observa, que en los meses en los que disminuyen las precipitaciones, especialmente entre enero y mayo, las temperaturas se encuentran entre 15°C y 30°C. En el anexo 1 se puede observar que, en estos mismos meses, los valores de evaporación total superan a los de precipitación; lo que sugiere escases hídrica aproximadamente la mitad del año.

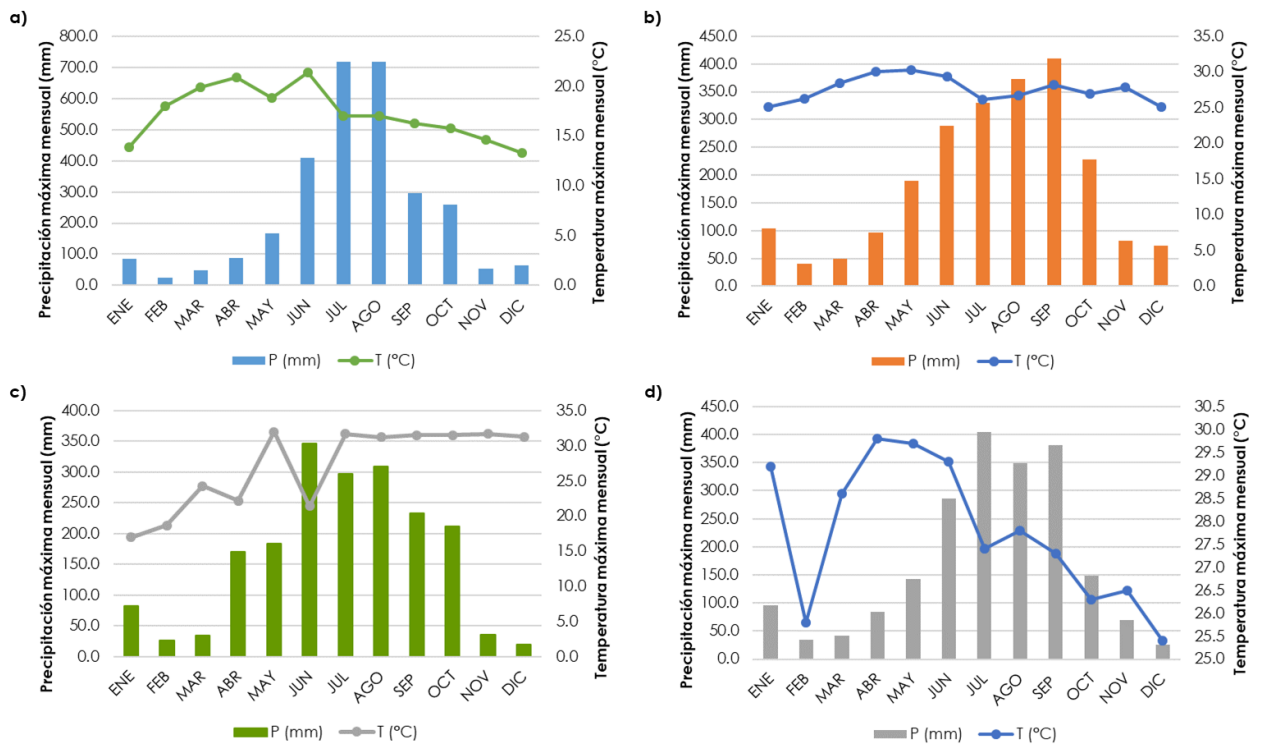


Figura 5. Climogramas.

a) Estación San Juan Tetla, **b)** Estación Balcon Diablo A. Texaluca, **c)** Estación San Juan Tetla Siete Norte, **d)** Estación San Baltazar Tetela, Dge.

8.1.2 Relieve: El relieve, es decir, el conjunto de formas que se presentan en la superficie de la tierra; tiene gran efecto sobre la posibilidad que tiene el suelo de evacuar el agua que recibe. Los suelos que se ubican en las partes más bajas del relieve son los que reciben los materiales que se están perdiendo en las partes altas por lo que presentan un proceso permanente de enriquecimiento. Al contrario, en las posiciones altas del relieve es más probable la remoción de material alterado por procesos de erosión, dificultando el desarrollo de suelos profundos (Jaramillo, 2002). El relieve en la zona de estudio consiste en llanura con lomerío de piso rocoso o cementado (Figura 6) (INEGI, 2001; INEGI, 2009; INEGI, 2014a; INEGI, 2016a).

8.1.3 Roca: El suelo se desarrolla controlado por varios factores y procesos, y a partir de un material parental; por lo que existe relación entre muchas de las propiedades y cualidades del suelo y las características del material de origen (Jaramillo, 2002). Este material, cuando es expuesto a las condiciones ambientales superficiales, es sometido a diferentes procesos de alteración y se produce el fraccionamiento y disgregación de sus componentes, así como la transformación de algunos de ellos. Estos productos de la alteración del material original quedan expuestos a los procesos de formación del suelo, llegando a conformar la gran variedad de suelos

(Jaramillo, 2002). La zona de estudio se compone fundamentalmente por roca ígnea extrusiva y sedimentaria (INEGI, 2009; INEGI, 2014a; INEGI, 2016a). De acuerdo con la Carta geológico-minera (SGM, 2014), en la parte central de la zona de estudio se encuentra lahar y en las regiones inferior y superior, andesita-brecha volcánica dacítica (Figura 7).

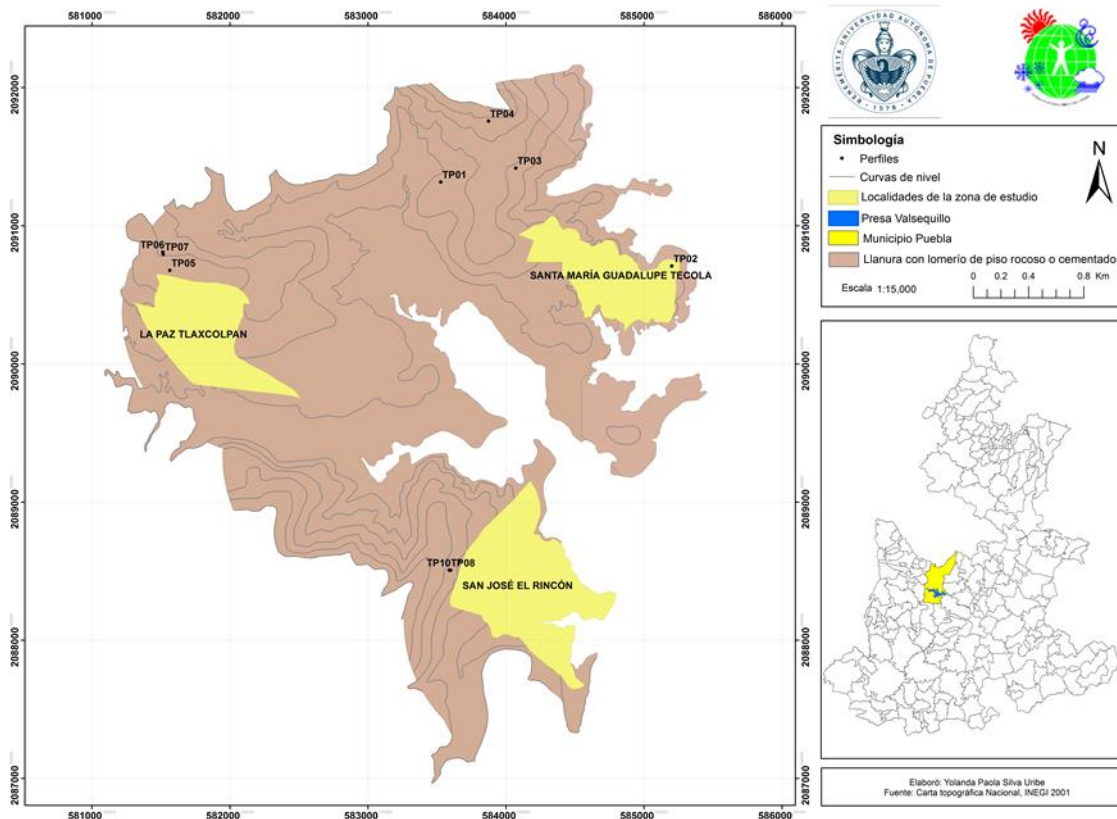


Figura 6. Mapa del relieve de la zona de estudio

8.1.4 Hidrografía: La zona de estudio cuenta con corrientes de agua intermitentes, las que se encuentran principalmente en las zonas entre Santa María Guadalupe Tecola y La Paz Tlaxcolpan; y entre ésta y San José el Rincón. Asimismo, cercano a la localidad de La Paz Tlaxcolpan se encuentra un cuerpo de agua intermitente. El único cuerpo de agua perenne en la región es la Presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo), en la que desembocan las corrientes intermitentes (INEGI, 2016a).

8.1.5 Suelo: Los suelos que predominan en la zona de estudio son el Phaeozem, Regosol, Vertisol y Leptosol (INEGI, 2009; INEGI, 2014a; INEGI, 2015; INEGI, 2016a). Las localidades de Santa María Guadalupe Tecola y la Paz Tlaxcolpan se ubican

principalmente sobre Leptosol, Phaeozem y Regosol, mientras que San José el Rincón se encuentra sobre Vertisol y Leptosol.

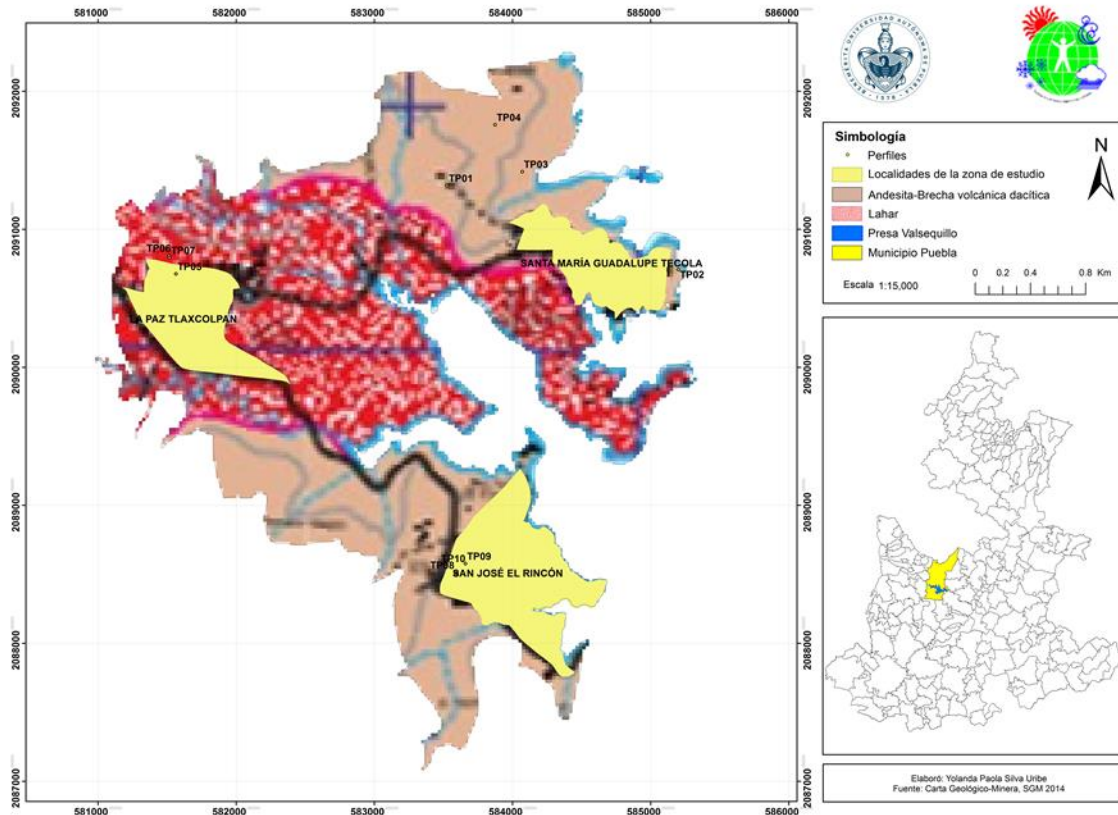


Figura 7. Mapa geológico de la zona de estudio.

8.1.6 Uso de suelo: El ser humano tiene gran injerencia en el suelo, pues utiliza este recurso de diversas formas y para muchos fines. El uso irracional de éste puede ocasionar deterioro severo en sus propiedades, como la pérdida de productividad y de cobertura vegetal, el aumento de la susceptibilidad a la erosión y la contaminación tanto del suelo, como de recursos como el agua (Jaramillo, 2002)). El suelo en la zona de estudio es empleado, en su mayoría, para la agricultura de temporal; y en menor proporción en vegetación inducida (Figura 8) (INEGI, 2009; SEDESOL, 2013; INEGI, 2014a; INEGI, 2016a). El uso potencial agrícola de esta región es de tracción animal estacional y el uso potencial pecuario es para el aprovechamiento de la vegetación natural únicamente por el ganado caprino y la vegetación natural diferente del pastizal (INEGI, 2014a).

8.1.7 Actividad económica: La principal actividad económica desarrollada tanto en Santa María Guadalupe Tecola, como en La Paz Tlaxcolpan y San José el Rincón; es la agricultura (INAFED, 2010; INEGI, 2010).

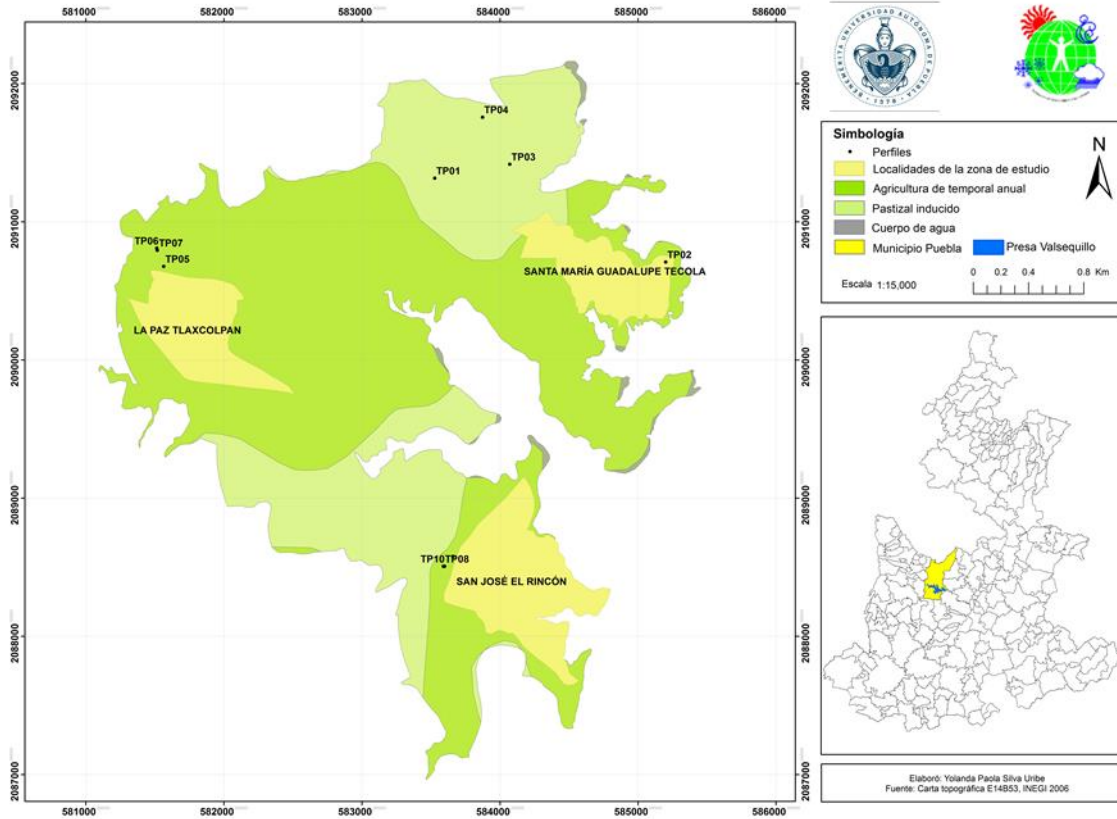


Figura 8. Mapa de uso de suelo en la zona de estudio.

8.1.8 Grado de marginación y rezago social: 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 (CONAPO, 2012). El rezago social es una medida en la que además de incorporar variables de educación, de servicios básicos en la vivienda, de calidad y espacios en la misma, y de activos en el hogar, también se incorpora el acceso a servicios de salud, es decir, proporciona el resumen de cuatro carencias sociales de la medición de pobreza del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL); rezago educativo, acceso a los servicios de salud, acceso a los servicios básicos en la vivienda y la calidad y espacios en la misma (CONEVAL, 2010). El grado de marginación en 2010 en las tres localidades de estudio era alto (CONAPO, 2012; SEDESOL, 2013); mientras que el grado de rezago social en el mismo año era bajo en Santa María Guadalupe Tecola y medio en La Paz Tlaxcolpan y en San José el Rincón (CONEVAL, 2010; SEDESOL, 2013). Esto sugiere que las carencias sociales en esta zona no son extremas pero la capacidad de la población para superarlas es

deficiente lo que se puede agravar con la degradación del suelo, ya que su principal actividad económica es la agricultura.

8.2 Resultados fase de campo

Los resultados se presentan por contorno, empezando en cada uno por el perfil que presenta menor grado de erosión, denominado "de referencia"; y terminando con el más erosionado.

8.2.1 Contorno I.


En el Contorno I se describieron cuatro perfiles de suelos, TP01, TP02, TP03 y TP04; localizados en Santa María Guadalupe Tecola. Se desarrollan sobre andesita-brecha volcánica dacítica, en clima templado subhúmedo y en relieve ondulado con pendientes de 7 a 15%. El uso de suelo en esta zona es principalmente agrícola; pero también se emplea en pastoreo, comúnmente de ganado menor; y se encuentran laderas cuya cubierta vegetal es pasto. La profundidad de los suelos muestreados varía de los 93+ cm hasta los 5+ cm; y se estima que el contenido de materia orgánica en éstos es medio a bajo (SEMARNAT, 2002). Los grados de erosión de los perfiles aquí presentados son moderado, fuerte y muy fuerte.

8.2.1.1 Descripción del perfil TP01

El perfil TP01 fue tomado en la parte inferior de una ladera, la que termina en una cárcava que la divide de un terreno de cultivo; esto indica que en la zona han tenido lugar procesos de erosión laminar y en cárcavas que originaron la misma y causan el aporte de material a zonas bajas. En el Cuadro 1 se observa que la estructura presente en el primer horizonte es subangular, la que es un índice morfológico de la pérdida del horizonte A (Ruíz *et al.*, 1999) sin embargo, el color pardo y el contenido de materia orgánica de 3%, junto con el desarrollo medio del sistema radicular permite considerar que el horizonte A no se ha perdido por completo. En el Cuadro 2 se muestra la clasificación de los grados de erosión empleada por García, (2016). De acuerdo a ésta y a las características del perfil descritas (Cuadro 1), el grado de erosión es moderado.

El relieve en la zona en la que se ubica el perfil TP01 es ligeramente ondulado, con una pendiente del 7%. En la ladera en la que se ubica el perfil, la cubierta vegetal compuesta por pastizal consiste en un 40 a 60% y no se cultiva en esta zona (Figura 9); a diferencia de la ladera contigua, la que se emplea en la agricultura. En la zona se encuentran especies aisladas de *Tecoma stans* (trueno fuerte), *Opuntia sp.* (nopal), *Lantana achyranthifolia* (hierba mariposa) y *Agave sp.* (maguey) (Figura 10).

Cuadro 1. Características del perfil TP01 Santa María Guadalupe Tecola, Puebla.

Perfil TP01	Horizonte	Profundidad	Descripción
	AB	0-37 cm	Color pardo, contenido de materia orgánica del 3%, sistema radicular medianamente desarrollado de raíces finas, muy húmedo al tacto, estructura subangular muy pequeña, porosidad abundante, compacto, adhesivo, ligeramente plástico, textura arcillo limosa, contenido de gravas de 5%.
	B ₁	37-60 cm	Color pardo, húmedo al tacto, sistema radicular poco desarrollado de raíces medias y finas, estructura subangular mediana, porosidad moderada, compacto, adhesivo, ligeramente plástico, textura arcillo arenosa, contenido de gravas mayor al 5%.
	B ₂	60-93 cm	Color pardo oscuro, sistema radicular poco desarrollado de raíces medias y finas, medianamente húmedo al tacto, estructura subangular mediana y grande, porosidad escasa, presenta fases brillosas, es muy compacto, fuertemente adhesivo, muy plástico, textura arcillosa, contenido de gravas del 5 al 10% en estado avanzado de meteorización; exhibe grietas finas de ancho 3 mm y largo 3 a 10mm, fisuras y concreciones.
	D	93+ cm	Roca

“+”: indica que la profundidad del perfil puede ser mayor a la excavada.

Cuadro 2. Grados de erosión (García, 2016).

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



Figura 9. Relieve del perfil TP01, en Santa María Guadalupe Tecola.

De esta manera se observa que, la explotación agrícola, las condiciones del relieve y las lluvias que, aunque escasas, precipitan en un periodo corto de tiempo; han favorecido el arrastre de la parte superior del suelo, observándose una pérdida significativa del horizonte A lo cual, se considera, ha provocado el abandono de las parcelas y regeneración natural de las mismas. En la actualidad, esta parte de la zona de estudio presenta una vegetación escasa, en la que predomina *Tecoma stans*, especie característica de zonas alteradas y en algunos casos, empleada para el control de la erosión (Cervantes, 2002; CONABIO, 2016), aunque en el entorno no se observan evidencias de esto. Por lo tanto, se considera que la influencia humana en el entorno es moderada a fuerte.

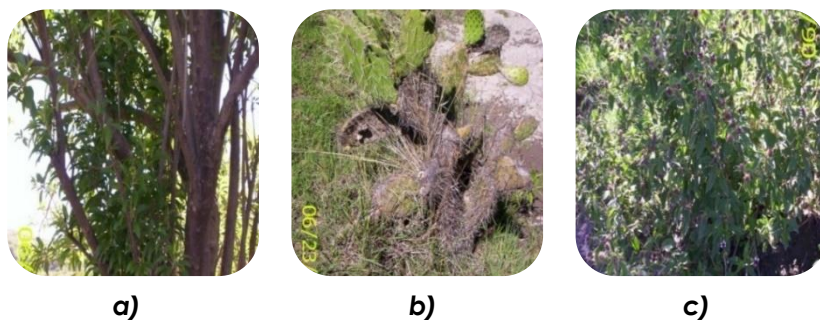


Figura 10. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP01.
a) *Tecoma stans*, **b)** *Opuntia* sp. **c)** *Lantana achyranthifolia*

8.2.1.2 Descripción del perfil TP02

El perfil TP02 se tomó en la parte media de una ladera de relieve ligeramente ondulado con una pendiente de 8%, en cuyo límite se encuentra un terreno de cultivo colindante con la presa de Valsequillo (Figura 11). El horizonte superficial es poco profundo, su color denota muy bajo contenido de materia orgánica (Cuadro

3), es claro en comparación con el observado en el terreno de cultivo, y hay montículos en la superficie que sugieren el transporte de material hacia zonas más bajas, lo que indica la presencia de procesos de erosión de tipo laminar que causan el aporte de material del suelo a dicho terreno y cuerpo de agua.

Cuadro 3. Características del perfil TP02 Santa María Guadalupe Tecola, Puebla.

Perfil TP02	Horizonte	Profundidad	Descripción
	BC	0-12 cm	Color grisáceo, muy bajo contenido de materia orgánica, consistencia suelta, presenta sistema radicular poco desarrollado de raíces medias.
	BCD	12-50+ cm	Color pardo claro a pardo grisáceo con manchas tenues de colores negro y rojizo, estructura subangular de tamaño pequeño, mediano, y grande, consistencia suelta, más compacta que el horizonte BC, presenta sistema radicular poco desarrollado de raíces medias.

“+”: indica que la profundidad del perfil puede ser mayor a la excavada.

La ausencia de horizonte A en el perfil, la pérdida parcial del B, así como la cercanía de la roca a la superficie; indican que el grado de erosión es fuerte (Cuadro 2). La cubierta vegetal en el área es escasa, consistiendo en un 0 a 20% de pastizal (Figura 11). También se encuentran especies aisladas de *Barkleyanthus salicifolius* (azomiate), *Ricinus communis* L. (higuerilla), *Agave sp.* (maguey), y *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (espino) (Figura 12).



Figura 11. Relieve del perfil TP02, en Santa María Guadalupe Tecola.

Las características del entorno sugieren que las condiciones del relieve, la susceptibilidad de los suelos a la erosión, el impacto de las precipitaciones escasas y esporádicas, así como el tránsito constante por esta zona, han favorecido la pérdida de la parte superior del suelo hasta el grado de erosión actual; así como el aporte de material tanto a la parcela colindante con la presa, como al mismo cuerpo de agua. Lo anterior, junto con la presencia de especies características de terrenos con disturbio y abandonados, como *Acacia farnesiana* (L.) Willd., *Ricinus communis* L. y *Barkleyanthus salicifolius* (CONABIO, 2016), indican que la influencia humana en el entorno es fuerte.



a)



b)



c)




d)

Figura 12. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP02.
a) *Barkleyanthus salicifolius*, **b)** *Ricinus communis* L. **c)** *Agave* sp., **d)** *Acacia farnesiana* (L.) Willd.

8.2.1.3 Descripción del perfil TP03

El perfil TP03 se encuentra en una ladera en la que se presentan afloramientos de gravas (30%), piedras (50%) y rocas (20%) en la superficie (Figura 13). Parte del suelo se encuentra retenido entre y debajo de dichas rocas, mientras que otra porción del mismo está expuesto directamente a los rayos del sol. El suelo protegido por las rocas es de color pardo oscuro, plástico y adhesivo (Cuadro 4); a diferencia del suelo que, al quedar descubierto en la superficie, se reseca y pierde materia orgánica; disminuyendo su fertilidad. Estas características, además de la poca profundidad del perfil, sugieren que la zona ha sido afectada por erosión laminar en grado muy fuerte (Cuadro 2).

Cuadro 4. Características del perfil TP03 Santa María Guadalupe Tecola, Puebla.

Perfil TP03	Horizonte	Profundidad	Descripción
	BCD	0-8 cm	Color pardo oscuro, contenido de materia orgánica mayor a 3%, sistema radicular poco desarrollado de raíces finas, seco al tacto, estructura granular mediana y pequeña, porosidad moderada, compacto, adhesivo, plástico, textura arcillo arenosa, contenido de gravas del 30% y de piedras y rocas del 40%.
	D	8-20+ cm	Roca

“+”: indica que la profundidad del perfil puede ser mayor a la excavada.

El relieve en la zona es ligeramente ondulado, con pendiente de 14%. La cubierta vegetal del área consiste en un 0 a 20% de pastizal (Figura 13); también se encuentran especies aisladas de *Opuntia* sp. (nopal) y *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (espino) (Figura 14); y cultivos de maíz en las partes altas.



Figura 13. Relieve del perfil TP03, en Santa María Guadalupe Tecola.

En las partes altas de esta zona, donde se encuentran terrenos de cultivo, no se observan medidas de conservación que impidan o disminuyan el transporte del suelo desprendido por el laboreo. Asimismo, las condiciones del relieve, la poca cobertura vegetal que permite la exposición del suelo a los factores climáticos, y el tránsito tanto de ganado como de pobladores y vehículos; han contribuido a la susceptibilidad del suelo a la erosión y, por lo tanto, a la significativa pérdida de material, la que ha derivado en el grado de erosión actual. Lo anterior, aunado a la presencia de algunas especies vegetales de *Acacia farnesiana* (L.) Willd., las que son indicadores de sitios perturbados (CONABIO, 2016); permite establecer que la influencia humana en el entorno es muy fuerte.



a)



b)

Figura 14. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP03.

a) *Opuntia* sp., **b)** *Acacia farnesiana* (L.) Willd.


8.2.1.4 Descripción del perfil TP04

El perfil TP04 se ubica en la parte media de una ladera; en la zona inferior de la misma se encuentran terrenos de cultivo en los que se observan, en el sentido de

la pendiente, oquedades alargadas y sinuosas de poca profundidad indicando la acción del proceso de erosión en surcos; mismo que se considera se encuentra en su etapa inicial y ocurrió también en la zona pendiente arriba en la que se encuentra el perfil, dando origen a las condiciones actuales de la zona. En esta ladera, se presentan afloramientos de gravas (30%), piedras (30%) y rocas (15%); asimismo se observan montículos de suelo (Figura 15) y zanjas alargadas en el sentido de la pendiente lo que indica la acción de la erosión laminar y en cárcavas; en grado muy fuerte (Cuadro 2), pues el horizonte A se ha perdido, el superficial remanente solo tiene 5 cm de profundidad y un alto porcentaje de fragmentos de material rocoso (Cuadro 5).

De la misma forma que en los perfiles anteriores, el relieve en la zona es fuertemente ondulado con una pendiente de 15%. La cobertura vegetal de la región consiste en un 20 a 40% de cultivos de maíz, y 0 a 20% de pastizal en el (Figura 15), además de especies de *Tecoma stans* (trueno fuerte) y *Lantana achyranthifolia* (hierba mariposa) (Figura 16).

Cuadro 5. Características del perfil TP04 Santa María Guadalupe Tecola, Puebla.

Perfil TP04	Horizonte	Profundidad	Descripción
	BCD	0-5 cm	Color pardo grisáceo, contenido de materia orgánica menor al 3%, sistema radicular poco desarrollado de raíces finas, medianamente húmedo al tacto, estructura subangular pequeña y mediana, porosidad abundante, consistencia friable, no adhesivo, ligeramente plástico, textura arcillo arenosa, contenido de gravas del 30%, de piedras 30%, y de rocas 15%.
	D	5+ cm	Roca

“+”: indica que la profundidad del perfil puede ser mayor a la excavada.

Las condiciones de relieve, las escasas precipitaciones y su impacto sobre el entorno, con poca cobertura vegetal; incrementan la susceptibilidad de los suelos a la erosión. Por otra parte, la ausencia del horizonte A, la presencia del horizonte BCD de poca profundidad, el color claro del suelo, la orientación de los surcos en los terrenos de cultivo, los que se encuentran en el sentido de la pendiente; así como los signos de erosión, indican que la explotación agrícola ha sido inadecuada; lo que ha derivado en la pérdida significativa de suelo, y el abandono de parcelas. En la región se observa la presencia de especies de *Tecoma stans*, las que suelen usarse en el control de la erosión (CONABIO, 2016), y las que se ubican en los límites de las parcelas, perpendiculares a la pendiente; sin embargo, tomando en cuenta las características anteriores se considera que la influencia humana en la zona es muy fuerte.



Figura 15. Relieve del perfil TP04, en Santa María Guadalupe Tecola.



a)



b)

Figura 16. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP04.

a) *Tecoma stans*, **b)** *Lantana achyranthifolia*.

En general, en los perfiles del Contorno I, se ha perdido el horizonte A, siendo el menor grado de erosión el moderado. Asimismo, a pesar de que los valores de pendiente son bajos, la susceptibilidad de los suelos a la erosión y la

desertificación se incrementa por el relieve ondulado de la zona; por la influencia humana en el entorno, que es significativa; así como por el efecto de las precipitaciones; permitiendo observar en campo importantes diferencias tanto en los perfiles como en el entorno de cada uno. Entre éstas, la disminución de la profundidad del perfil de referencia al más erosionado es notoria; así como la transformación en el color del suelo, pues en el perfil TP01 los colores son oscuros, mientras que en TP04 el color tiende a ser grisáceo. De la misma forma, se observa claramente la variación en el contenido de gravas, piedras y rocas; al aumentar éste a mayor grado de erosión.


8.2.2 Contorno II.

Los perfiles TP05, TP06 y TP07 que conforman el contorno II se ubican en La Paz Tlaxcolpan. Se desarrollan en una zona con presencia de lahar, donde el clima es templado subhúmedo y el relieve ondulado con pendientes de 3 a 4%. El uso de suelo en esta región es principalmente agrícola, aunque también se emplea en pastoreo de ganado mayor y menor. La profundidad de estos perfiles varía de 80+ cm a 45+ cm; y se estima un contenido medio a muy bajo de materia orgánica. Los grados de erosión de los perfiles aquí presentados son moderado-fuerte, muy fuerte y muy severo.

8.2.2.1 Descripción del perfil TP05

El perfil TP05 se localiza en una región de relieve ondulado con pendiente de 3%. En la parte alta de esta zona se encuentran zonas de cultivo (Figura 17) y; conforme se baja por la ladera, se observa el afloramiento de gravas (10%), piedras (10%) y rocas (20-30%), así como hendiduras de diferente ancho y largo en la superficie. Esto junto con las características del horizonte superficial como el color pardo y el desarrollo radicular que hacen referencia a un horizonte A, la estructura subangular distintiva de un horizonte B, y la presencia de gravas y piedras a partir de los 17 cm de profundidad (Cuadro 6); indican la acción de erosión laminar y en cárcavas en grado moderado a fuerte (Cuadro 2).

Cuadro 6. Características del perfil TP05 La Paz Tlaxcolpan, Puebla.

Perfil TP05	Horizonte	Profundidad	Descripción
	AB	0-17 cm	Color pardo con manchas grises, contenido de materia orgánica del 3%, sistema radicular muy desarrollado de raíces finas y grandes, húmedo al tacto, estructura en bloques y subangular mediana y pequeña, muy poroso, compacto, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, textura areno arcillosa.
	BC	17-37 cm	Color pardo, sistema radicular poco desarrollado de raíces medias y finas, medianamente húmedo al tacto, estructura en bloques y subangular mediana y grande, porosidad escasa, compacto, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, textura franco areno arcillosa, contenido de gravas 5% y de piedras 5-10%, grietas de 5-10 cm de largo y 3 mm de ancho, presenta fisuras.
	CD	37-80+ cm	Horizonte endurecido, de color pardo grisáceo. La reacción de la masa de los agregados al HCl al 10% es nula sin embargo, se observa una cantidad importante de carbonatos que recubren las paredes de los agregados, en ocasiones muy abundantes; y en otras se asemeja al carbonato secundario de zonas áridas.

“+”: indica que la profundidad del perfil puede ser mayor a la excavada.

La cubierta vegetal en el área consiste en un 40 a 60% de cultivos de maíz en zonas altas y 20 a 40% de pastizal en el resto del área (Figura 17). También se encuentra *Opuntia sp.* (nopal) y *Acacia farnesiana (L.) Willd.* (espino) (Figura 18); estos últimos

por lo general encontrados en parcelas abandonadas y terrenos con disturbio (CONABIO, 2016).



Figura 17. Relieve del perfil TP05, en La Paz Tlaxcolpan.

En la zona se observa que algunos de los cultivos están colocados perpendiculares a la pendiente lo que permite reducir la pérdida de suelo. Sin embargo, las parcelas colindan con un camino que sirve para transitar hacia zonas más bajas en el que se han formado cárcavas. Las precipitaciones, junto con las características del relieve, han contribuido a que las paredes de dichas cárcavas se incrementen en altura; constituyendo una vía de transporte del suelo desprendido por el laboreo en las parcelas colindantes y en las zonas altas, pues en estos límites no hay medidas que lo impidan. Además, considerando la falta casi total de horizontes A y B; la escasa cobertura vegetal, especialmente en la parte media e inferior de la ladera en la que no se cultiva; y el aspecto pobre de algunos de los cultivos; se establece que la influencia humana en el entorno es fuerte.

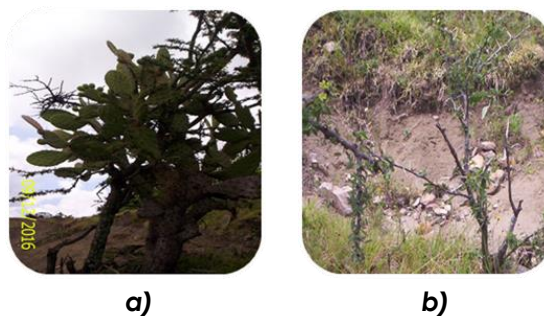


Figura 18. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP05.
a) *Opuntia* sp., **b)** *Acacia farnesiana* (L.) Willd.

8.2.2.2 Descripción del perfil TP06

El perfil TP06, de la misma forma que el TP05, se encuentra en una zona de relieve ondulado con 4% de pendiente (Figura 19); en la que también se presentan signos de erosión laminar y en cárcavas. El perfil TP06 presenta los mismos horizontes que el anterior, sin embargo, en éste, el espesor de éstos y la profundidad del perfil son menores, el color del suelo es más claro, el desarrollo radicular menor (Cuadro 7), y se presenta mayor afloramiento de gravas (15-20%), piedras (15-20%) y rocas (5%) en la superficie; características que junto a la pérdida prácticamente total del horizonte A, y a la reducción del horizonte AB en un 53% en comparación al perfil TP05; indican muy fuerte grado de erosión (Cuadro 2).


La cubierta vegetal en el área consiste en 0 a 20% de pastizal. También se encuentra en la zona *Ipomoea murucoides* Roem. et Schult. (cazahuate), *Tecoma stans* (trueno fuerte), *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (espino) y *Opuntia* sp. (nopal) (Figura 20).



Figura 19. Relieve del perfil TP06, en La Paz Tlaxcolpan.

En la zona en la que se ubica este perfil, se encuentran tanto terrenos cultivados como regiones abandonadas en las que se observan las especies vegetales mencionadas anteriormente y es posible la regeneración natural, sin embargo, la condición irregular del relieve y el impacto de las precipitaciones sobre la superficie con cobertura vegetal escasa han contribuido tanto a la susceptibilidad del suelo a la pérdida de material, así como al grado de erosión actual. Asimismo, los cultivos en algunas parcelas en la parte alta de la ladera son de aspecto pobre y en éstas no se observan medidas que impidan el transporte del suelo a las zonas bajas; aunado a esto, la pérdida significativa del horizonte A, y su poca profundidad; sugieren que la explotación agrícola ha sido inadecuada y que la influencia humana es muy fuerte.

Cuadro 7. Características del perfil TP06 La Paz Tlaxcolpan, Puebla.

Perfil TP06	Horizonte	Profundidad	Descripción
	AB	0-9 cm	Color pardo claro, sistema radicular poco desarrollado de raíces finas, reacción débil al HCl al 10%, húmedo al tacto, estructura subangular mediana y pequeña, porosidad abundante, friable, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, textura areno franco arcillosa, contenido de gravas menor al 5% y de piedras 10 a 15%.
	BC	9-18 cm	Color pardo grisáceo, sistema radicular poco desarrollado de raíces finas, reacción fuerte al HCl al 10%, medianamente húmedo al tacto, estructura subangular mediana poco desarrollada, porosidad moderada, compacto, ligeramente adhesivo, ligeramente plástico, textura limo arcillosa, contenido de gravas y piedras menor al 5%.
	CD	18-45+ cm	Capa parecida al BC, compacta, de roca muy alterada, de color pardo claro, reacción nula de la masa de los agregados al HCl al 10%, solo reaccionan las caras de los agregados que tienen carbonatos en forma de micelios dentro de la roca.

“+”: indica que la profundidad del perfil puede ser mayor a la excavada.

8.2.2.3 Descripción del perfil TP07

El perfil TP07 se ubica en la misma región de relieve ondulado y 4% de pendiente que los perfiles TP05 y TP06 (Figura 21), pero en la parte baja de la ladera. En esta zona se observa el afloramiento de rocas (90%) y amplias zanjas alargadas en el sentido de la pendiente; indicando la acción de la erosión laminar y en cárcavas.

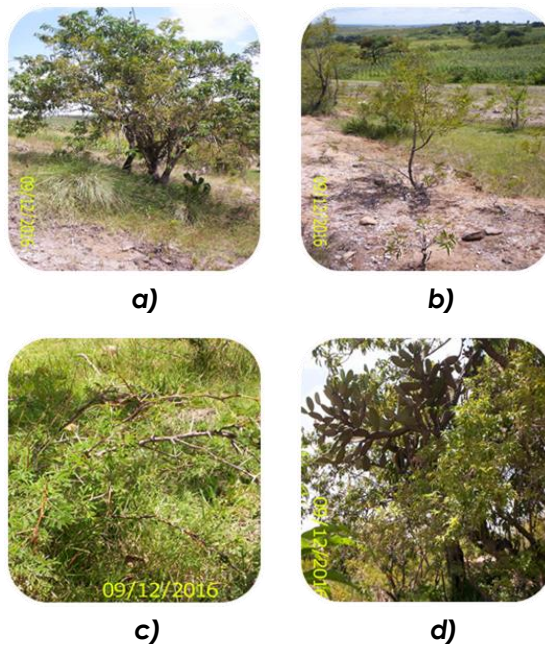



Figura 20. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP06.
a) *Ipomoea murucoides* Roem. et Schult., **b)** *Tecoma stans*, **c)** *Acacia farnesiana* (L.) Willd.,
d) *Opuntia* sp.

Este perfil, a pesar de encontrarse en un área baja en la que es posible encontrar un horizonte formado por el material desprendido en las zonas altas, carece de horizontes; solo presenta ligera acumulación de suelo en las raíces de la vegetación que aún se mantiene; seguida de dos capas de roca con diferente grado de meteorización (Cuadro 8) por lo que se determina que el grado de erosión es muy severo (Cuadro 2).

La cobertura vegetal del área consiste en un 0 a 20% de pastizal (Figura 21). También se encuentran especies aisladas de *Opuntia* sp. (nopal) y *Tecoma stans* (trueno fuerte) (Figura 22); y cultivos de maíz en zonas altas y alejadas, como en los dos perfiles anteriores.

Cuadro 8. Características del perfil TP07 La Paz Tlaxcolpan, Puebla.

Perfil TP07	Horizonte	Profundidad	Descripción
	Capa 1	0-4 cm	Capa superficial de roca muy alterada, presenta sistema radicular poco desarrollado de raíces finas.
	Capa 2	4-60+ cm	Capa de roca fuertemente meteorizada, presenta sistema radicular poco desarrollado de raíces finas y medias.

“+”: indica que la profundidad del perfil puede ser mayor a la excavada.

En esta región, se considera que las características del relieve, los factores climáticos actuando sobre la superficie con escasa vegetación y la ausencia de medidas que impidan el transporte del suelo proveniente de las zonas altas, ha contribuido a la pérdida significativa del suelo, derivando en suelos con erosión muy severa, aún en regiones bajas.



Figura 21. Relieve del perfil TP07, en La Paz Tlaxcolpan.

Como se mencionó anteriormente, en esta parte del entorno, se encuentran especies de *Tecoma stans*, las que contribuyen a la conservación del suelo (CONABIO, 2016), sin embargo, no se observa la aplicación de medidas con dicho fin y esto, junto con la pérdida de los horizontes A y B, la presencia de cárcavas y el elevado porcentaje de rocas en la superficie, indica que la influencia humana en el entorno es muy fuerte.

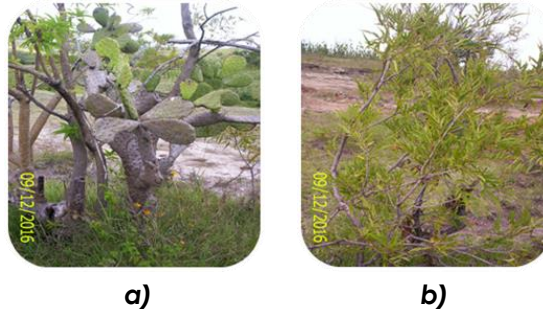


Figura 22. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP07.
a) *Opuntia* sp., **b)** *Tecoma stans*.

De la misma forma que en la primera localidad; en los perfiles del Contorno II se ha perdido gran parte del horizonte A, siendo el menor grado de erosión el moderado-fuerte. Las zonas de cultivo en general se ubican en regiones planas, y las que se encuentran en laderas están ubicadas de forma perpendicular a la pendiente; sin embargo, se observa que los límites de estas zonas constituyen un lugar por el que fácilmente se pierde el suelo, lo que junto con el relieve ondulado de la zona; incrementa la susceptibilidad de los suelos a la erosión y la desertificación; permitiendo encontrar regiones con grado de erosión muy severo y observar el cambio del paisaje después de un periodo de lluvias. Entre las características en las que se ve más claramente la transformación del perfil de referencia al más erosionado, se encuentra la profundidad, la que disminuye a mayor grado de erosión. En este caso, también se observa la variación en el color del suelo, aunque es menos clara que en el Contorno anterior y se percibe, además, la disminución del sistema radicular, especialmente entre el perfil TP05 y TP06.

8.2.3 Contorno III.

Los perfiles TP08, TP09 y TP10, ubicados en San José el Rincón, conforman el contorno III. Se desarrollan sobre andesita-brecha volcánica dacítica, en clima

templado subhúmedo y en relieve ondulado con pendientes de 14 a 15%. El principal uso de suelo en esta zona es agrícola, seguido de pastoreo de ganado mayor y menor. La profundidad de los suelos cambia de los 100+ cm a 40+ cm y se estima que el contenido de materia orgánica de estos es alto a bajo. Los grados de erosión de los perfiles aquí presentados son moderado, fuerte a muy fuerte y muy fuerte.

8.2.3.1 Descripción perfil TP08


El perfil TP08 fue tomado en una zona de relieve fuertemente ondulado con pendiente de 15% (Figura 23); en la que hay afloramiento de piedras (5%) y una hendidura de paredes verticales lo que, junto con la pérdida del horizonte A, la presencia de un horizonte B de 28 cm de profundidad, el color pardo del suelo que sugiere un contenido de materia orgánica mayor a 3%, el desarrollo mediano del sistema radicular y la presencia de gravas, piedras y rocas en el perfil (Cuadro 9); sugiere la acción de la erosión en cárcavas en grado moderado (Cuadro 2). La cubierta vegetal del área consiste en un 40 a 60% de pastizal; también se encuentra *Ipomoea murucoides* Roem. et Schult. (cazahuate) y especies aisladas de *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (espino) (Figura 24).

En esta zona se considera que las condiciones del relieve, en el que la pendiente es mayor que en los Contornos anteriores, el pastoreo y el tránsito, especialmente de ganado, favorecen el arrastre del suelo, lo que se incrementa por la acción de las precipitaciones; a pesar de que la cobertura vegetal es mayor, en comparación a los casos anteriores. Asimismo, se considera que la influencia humana en el área es muy fuerte, ya que, aunque en esta zona no se cultiva; se ha perdido el horizonte A, hay afloramiento de piedras y, aunque aisladas, se encuentran especies de *Acacia farnesiana* (L.) Willd., indicadoras de sitios perturbados (CONABIO, 2016).



Figura 23. Relieve del perfil TP08, en San José el Rincón.

Cuadro 9. Características del perfil TP08 San José el Rincón, Puebla.

Perfil TP08	Horizonte	Profundidad	Descripción
	B	0-28 cm	Color pardo, contenido de materia orgánica mayor al 3%, sistema radicular medianamente desarrollado de raíces finas y medias, medianamente húmedo al tacto, estructura subangular mediana y grande; porosidad moderada, compacto, adhesivo, plástico, textura arcillosa, contenido de gravas del 15 al 20%, y 5% de piedras y rocas en conjunto; exhibe abundantes grietas de ancho 3 a 5 mm y largo 1 a 15 cm; así como abundantes fisuras.
	B _T	28-50 cm	Color pardo oscuro, contenido de materia orgánica mayor al 3%, sistema radicular poco desarrollado de raíces finas, húmedo al tacto, estructura subangular mediana y grande, presenta fases brillosas y películas, porosidad escasa, muy compacto, fuertemente adhesivo, muy plástico, textura arcillosa, contenido de gravas menor al 5%, y menos del 5% de piedras y rocas en conjunto; muestra algunas grietas.
	BC	50-73 cm	Color pardo claro, contenido de materia orgánica del 3%, sistema radicular poco desarrollado de raíces medias, húmedo al tacto, estructura subangular mediana y grande, presenta fases brillosas, porosidad escasa, compacto, adhesivo, plástico, textura franco arcillosa, contenido de gravas menor al 5%.
	C	73-100+ cm	Capa compacta de color pardo amarillento, presenta estructura subangular mediana, y algunas gravas de color negro y manchas grises. No reacciona al HCl al 10%.

"+": indica que la profundidad del perfil puede ser mayor a la excavada.

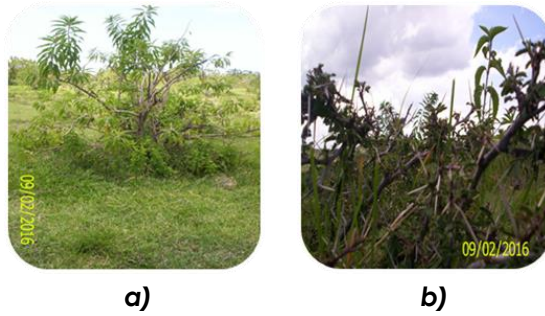


Figura 24. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP08.
a) *Ipomoea murucoides* Roem. et Schult., **b)** *Acacia farnesiana* (L.) Willd.

8.2.3.2 Descripción del perfil TP09


El perfil TP09 se ubica en la parte inferior de una ladera de relieve fuertemente ondulado con 14% de pendiente en la que abundan los cazahuates, se presentan afloramientos de gravas (40%), piedras (40%) y rocas (5%) (Figura 25); y limita con un camino que presenta importante contenido de las mismas; lo que indica que en la zona ha tenido lugar el proceso de erosión laminar en grado fuerte a muy fuerte (Cuadro 2), y ha ocurrido el aporte de material de zonas altas a bajas, lo que se refleja en la presencia de gravas, piedras y rocas en el camino mencionado y en el perfil; así como en la presencia de un horizonte B de color pardo oscuro, textura arcillosa, estructura subangular y con sistema radicular medianamente desarrollado (Cuadro 10).

La cubierta vegetal en el área consiste en un 40 a 60% de pastizal (Figura 25); y también se encuentran especies como *Opuntia* sp. (nopal), *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (espino), *Agave* sp. (maguey) y *Ipomoea murucoides* Roem. et Schult. (cazahuate) (Figura 26); éste último principalmente en la parte alta de la ladera donde se ubica el perfil.



Figura 25. Relieve del perfil TP09, en San José el Rincón.

Cuadro 10. Características del perfil TP09 San José el Rincón, Puebla.

Perfil TP09	Horizonte	Profundidad	Descripción
	B	0-16 cm	Color pardo oscuro, contenido de materia orgánica mayor al 3%, sistema radicular medianamente desarrollado de raíces finas, medianamente húmedo al tacto, estructura en bloques y subangular mediana, porosidad moderada, compacto, fuertemente adhesivo, muy plástico, textura arcillosa, contenido de gravas de 20 a 30%, de piedras del 10% y de rocas del 5%; exhibe grietas de ancho 3 a 5mm y largo 5 a 8 cm, presenta abundantes fisuras, manchas herrumbrosas y grises.
	C	16-37 cm	Capa de roca fuertemente meteorizada, color pardo claro con abundantes manchas de tono claro de reacción fuerte al HCl al 10%, sistema radicular poco desarrollado de raíces finas, estructura rocosa, porosidad escasa, compacta a muy compacta, presenta 5-15% de gravas y rocas; y se observa una acumulación, en forma de película, de carbonatos entre los agregados.
	CD	37-70+ cm	Similar al horizonte C, la diferencia está en que el material en éste es más parecido a la roca. Presenta estructuras definidas de color pardo; entre sus agregados hay películas de 1 a 3 mm de material calcáreo muy compacto. Una parte de la masa dentro de los agregados, reacciona moderadamente al HCl al 10% y hay carbonato disgregado en el material.

“+”: indica que la profundidad del perfil puede ser mayor a la excavada.

En esta región no se observan signos de explotación agrícola, pero sí de pastoreo y tránsito de vehículos, como en el perfil anterior. Esto junto con las características del relieve y de las precipitaciones, incrementa la susceptibilidad del suelo a la erosión. Por otra parte, tomando en cuenta que se ha perdido totalmente el horizonte A, los signos de erosión fuerte, la presencia de especies vegetales características de zonas perturbadas, como *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (Cervantes, 2002; CONABIO, 2016); y la ausencia de medidas para el control de la erosión, se considera que es muy fuerte la influencia humana en el entorno.

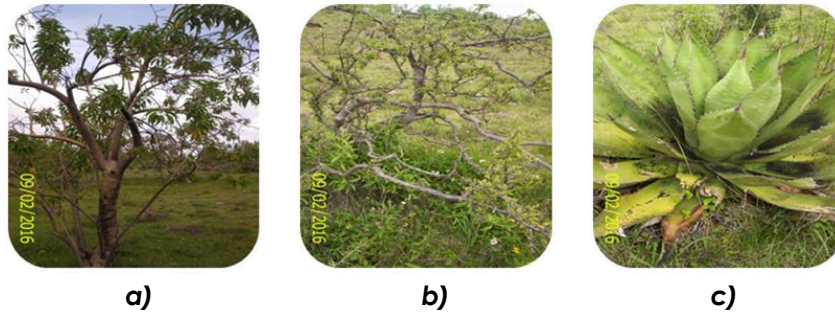


Figura 26. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP09.
a) *Ipomoea murucoides* Roem. et Schult., **b)** *Acacia farnesiana* (L.) Willd., **c)** *Agave* sp.

8.2.3.3 Descripción del perfil TP10


El perfil TP10, de la misma forma que los perfiles TP08 y TP09, fue tomado en una zona de relieve fuertemente ondulado con 15% de pendiente en la que hay afloramiento de gravas (40%), piedras (40%) y rocas (5%) en la superficie y se observa una hendidura propia del relieve de la zona pero que ha perdido la capa superficial del suelo (Figura 27), dejando expuesto material de color pardo claro que forma parte de un horizonte BC de 9 cm de espesor, con poco desarrollo radicular y que contiene también gravas, piedras y rocas (Cuadro 11); lo que indica la acción de erosión laminar y en cárcavas en grado muy fuerte (Cuadro 2).

La cubierta vegetal en el área consiste en 20 a 40% de pastizal (Figura 27); y también se encuentran algunas especies de *Ipomoea murucoides* Roem. et Schult. (cazahuate) y *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (espino) (Figura 28).



Figura 27. Relieve del perfil TP10, en San José el Rincón.

Cuadro 11. Características del perfil TP10 San José el Rincón, Puebla.

Perfil TP10	Horizonte	Profundidad	Descripción
	BC	0-9 cm	Color pardo claro, contenido de materia orgánica menor al 3%, sistema radicular poco desarrollado de raíces finas, reacción fuerte ante el HCl al 10%, estructura subangular pequeña y mediana, medianamente húmedo al tacto, porosidad abundante, compacto, no adhesivo, no plástico, textura franco arcillosa, contenido de gravas entre 20 y 30%, 10% de piedras y menos del 5% de rocas; exhibe pequeñas fisuras.
	C	9-18 cm	Capa muy meteorizada, se disgrega con facilidad, presenta raíces finas, reacción muy fuerte al HCl al 10%, no es compacto; los agregados forman una masa de color pardo. Parece que durante el proceso de meteorización, el material calcáreo pierde su compactación y se presenta en el borde de los agregados como una especie de película en forma de polvillo, proveniente de las venas de cuarzo que originalmente forman parte de la roca en estado compacto.
	CD	18-40+ cm	Capa de color pardo, el material en ésta es más parecido a la roca que en C; presenta estructuras definidas; entre sus agregados hay películas de 1 a 3 mm de material calcáreo y manchas de color negro; dentro de los agregados una parte de la masa reacciona muy fuerte al HCl al 10%.

“+”: indica que la profundidad del perfil puede ser mayor a la excavada.

De la misma forma que en los perfiles anteriores, de este Contorno, no se observan signos de explotación agrícola y se considera que las condiciones del relieve junto con los factores climáticos han favorecido el arrastre del suelo ocasionando la pérdida del horizonte A y parte del B, y el afloramiento de gravas, piedras y rocas. Asimismo, en esta zona también se observa *Acacia farnesiana* (L.) Willd., especies que suelen presentarse en zonas alteradas, y que podrían emplearse en el control de la erosión sin embargo (CONABIO, 2016), se encuentran dispersos y no se

observan medidas para el control de la pérdida de suelo. De esta manera, se considera que la influencia humana en el entorno es muy fuerte.

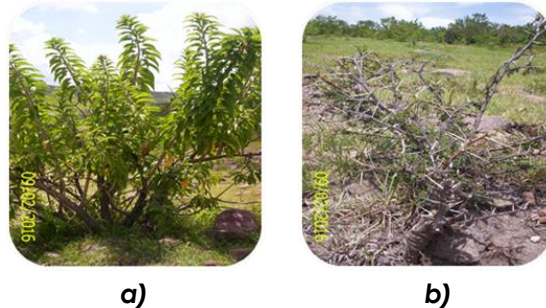


Figura 28. Vegetación de la zona correspondiente al perfil TP10.
a) *Ipomoea murucoides* Roem. et Schult., **b)** *Acacia farnesiana* (L.) Willd.

En los perfiles del Contorno III, la pérdida del horizonte A es total. Se considera que, como en los dos Contornos anteriores, la influencia humana en el entorno incrementa la susceptibilidad de los suelos a los procesos de erosión y desertificación, pues el uso del suelo para la agricultura es regular, ya que ésta es la principal actividad económica desarrollada en la región. Sin embargo, en este caso, también tiene gran influencia el relieve ondulado con pendientes más pronunciadas. Esto permite percibir diferencias tanto en los perfiles evaluados como en su entorno. En este caso la disminución de la profundidad de los perfiles a mayor grado de erosión es clara, así como el cambio en el color del suelo, de oscuro a claro; el incremento de gravas, piedras y rocas; y ligeramente la disminución del sistema radicular, del perfil TP08 al TP10.

En el Cuadro 12 se concentran los resultados obtenidos del diagnóstico del impacto de la actividad humana y del grado de erosión llevado a cabo como parte de la fase de campo, en la región correspondiente a cada perfil.

Por otra parte, de acuerdo con la Figura 29, elaborada a partir de la carta topográfica de CONABIO (2008), la vegetación principal encontrada en la zona de estudio es el pastizal y el bosque de coníferas y latifoliadas, es decir, especies de pinos (*Pinus*), abetos (*Abies*); y de hoja ancha, como el encino (*Quercus*); estos últimos encontrados principalmente en regiones de clima templado subhúmedo (CONABIO, 2016).

Cuadro 12. Pendiente, grado de erosión, influencia humana y vegetación en los perfiles.

Contorno	Perfiles	Pendiente	Grado de erosión	Influencia humana	Vegetación
I	TP01	7%	Moderado	Moderada-fuerte	<i>Tecoma stans</i> , <i>Opuntia sp.</i> , <i>Lantana achyranthifolia</i> y <i>Agave sp.</i>
	TP02	8%	Fuerte	Fuerte	<i>Barkleyanthus salicifolius</i> , <i>Ricinus communis L.</i> , <i>Agave sp.</i> y <i>Acacia farnesiana (L.) Willd.</i>
	TP03	14%	Muy fuerte	Muy fuerte	<i>Opuntia sp.</i> y <i>Acacia farnesiana (L.) Willd.</i>
	TP04	15%	Muy fuerte	Muy fuerte	<i>Tecoma stans</i> y <i>Lantana achyranthifolia</i>
II	TP05	3%	Moderado-fuerte	Fuerte	<i>Opuntia sp.</i> y <i>Acacia farnesiana (L.) Willd.</i>
	TP06	4%	Muy fuerte	Muy fuerte	<i>Ipomoea murucoides Roem. et Schult.</i> , <i>Tecoma stans</i> , <i>Acacia farnesiana (L.) Willd.</i> y <i>Opuntia sp.</i>
	TP07	4%	Muy severo	Muy fuerte	<i>Opuntia sp.</i> y <i>Tecoma stans</i>
III	TP08	15%	Moderado	Muy fuerte	<i>Ipomoea murucoides Roem. et Schult.</i> y <i>Acacia farnesiana (L.) Willd.</i>
	TP09	14%	Fuerte-muy fuerte	Muy fuerte	<i>Opuntia sp.</i> , <i>Ipomoea murucoides Roem. et Schult.</i> , <i>Acacia farnesiana (L.) Willd.</i> y <i>Agave sp.</i>
	TP10	15%	Muy fuerte	Muy fuerte	<i>Ipomoea murucoides Roem. et Schult.</i> y <i>Acacia farnesiana (L.) Willd.</i>

Los resultados de la fase de campo indican que las principales especies vegetales presentes son *Acacia farnesiana (L.) Willd.* (espino), *Tecoma stans* (trueno fuerte), *Opuntia sp.* (nopal), *Lantana achyranthifolia* (hierba mariposa), *Agave sp.* (maguey), *Barkleyanthus salicifolius* (azomiate), *Ricinus communis L.* (higuerilla) e *Ipomoea murucoides Roem. et Schult.* (cazahuate). Como se menciona anteriormente, especies como el espino, trueno fuerte, azomiate e higuerilla, suelen encontrarse a orilla de caminos, en arroyos, barrancas, sitios pedregosos, parcelas abandonadas, terrenos con disturbio, sucesionales y sitios ruderales (CONABIO, 2016).

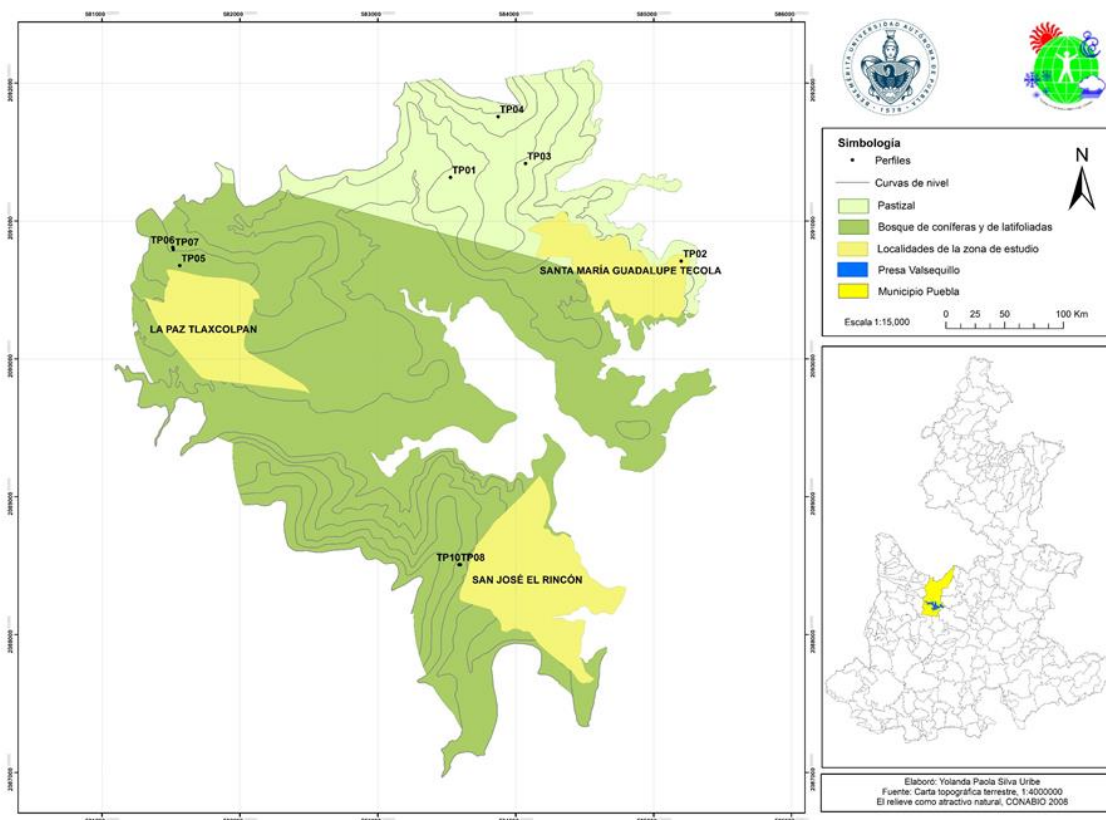


Figura 29. Tipo de vegetación en el área de estudio.

Otras especies como nopal, maguey, cacahuate y también el espino son características de zonas áridas y semiáridas (Cervantes, 2002; CONABIO, 2016). Asimismo, en la Figura 8 (página 26), mostrada en la descripción de la zona de estudio, se observa que el uso de suelo en la zona es principalmente agricultura de temporal, abarcando un 70.5%; lo anterior sugiere que la vegetación, un componente de la tierra (López, 2002; SEMARNAT, 2013); se está degradando debido a la actividad humana en el entorno; región en la que también se encuentran especies tolerantes a la falta de agua. Así, se considera que la presencia de determinadas especies vegetales se puede emplear como indicador para alertar sobre la degradación de la tierra en zonas susceptibles a la desertificación.

8.3 Resultados y discusión de las características del suelo evaluadas

Se presentan los resultados de las características morfológicas, físicas, químicas y biológicas de los perfiles, por variable evaluada.

8.3.1 Características morfológicas

8.3.1.1 Profundidad. García-Fayos, (2004), y Brunel y Seguel, (2011) mencionan que la erosión resulta en la reducción de la profundidad del horizonte superior. Este efecto se observa en los tres contornos estudiados, al ser menor dicho parámetro en los perfiles más erosionados, en relación con los de referencia. En el Contorno I la profundidad de los horizontes superficiales disminuye de 37 cm en TP01, hasta 5 cm en TP04; en el Contorno II de 17 cm en TP05 a 4 cm en TP07; y en el Contorno III de 28 cm en TP08, hasta 9 cm en TP10 (Figura 30).

Asimismo, se observa que, a medida que se incrementa el grado de erosión; se reduce la profundidad de los perfiles. En el Contorno I, la profundidad del perfil TP01 es de 93 cm, mientras que la de TP04 es de 5 cm. En el contorno II, el perfil TP05 tiene 80 cm de profundidad, valor que disminuye hasta 60 cm en TP07. En el contorno III, la profundidad del perfil TP08 es de 100 cm, mientras que en TP10 la pérdida de suelo ha sido mayor derivando en un perfil de 40 cm (Figura 30).

De esta manera se observa que la transformación en esta variable, provocada por el proceso de erosión, y observada en todos los perfiles evaluados, es la disminución de la profundidad de los horizontes superficiales a mayor grado de erosión; la que puede emplearse como indicador de este proceso.

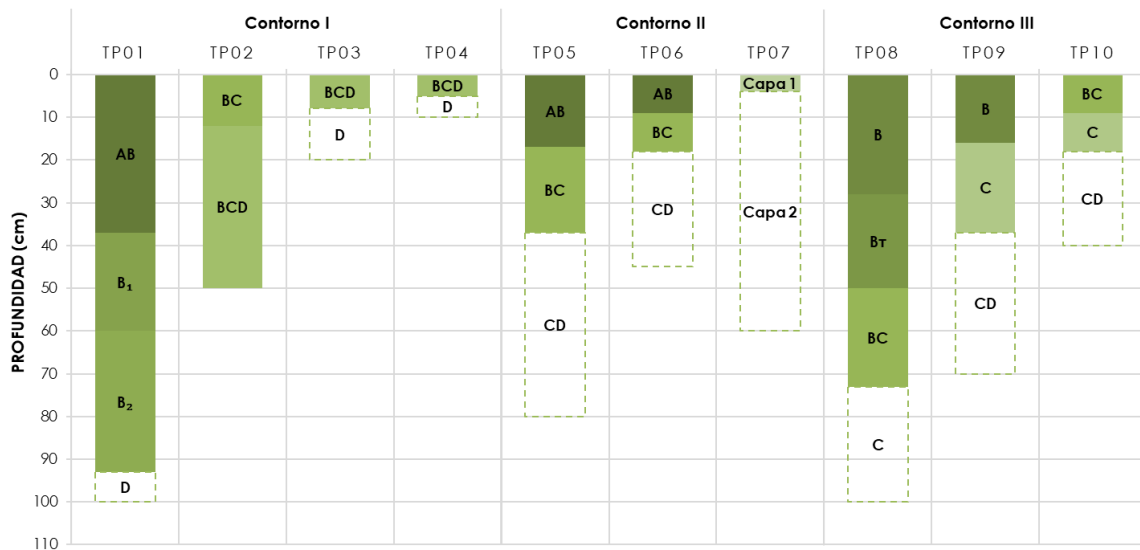


Figura 30. Profundidad de los horizontes de los perfiles estudiados.

8.3.1.2 Color. El color dominante de los suelos estudiados es rojo amarillento (10YR); el que en general cambia de oscuro a claro a medida que se incrementa la profundidad dentro de los perfiles estudiados; pero principalmente en los horizontes superficiales de los mismos conforme la pérdida del suelo es mayor, es decir, de los

perfiles de referencia a los más erosionados (Figura 31). Esta transformación se refleja en el parámetro value (claridad) que define el grado de oscuridad del color, se representa mediante una escala en la que cero corresponde al negro puro y 10 al blanco puro; y se expresa como numerador. Los colores oscuros tienen value entre 0 y 5 y los claros entre 5 y 10 (Jaramillo, 2002). En los horizontes superiores, el value determinado en seco (Figura 31a), cambia de 4 en el perfil TP01 a 6 en TP04, de 3 en TP05 a 6 en TP07, y de 4 en TP08 a 5 en TP10. En húmedo (Figura 31b), este parámetro varía de 2 a 5 en los perfiles TP01 y TP04, respectivamente; de 3 en TP05 a 4 en TP06; y de 3 en TP08 a 4 en TP10, es decir, el value es mayor en los perfiles más erosionados, indicando colores más claros. En el contorno I, se considera que los valores de TP03 similares a TP01 se deben a que parte del suelo del primero está retenido debajo de las rocas que afloran en la superficie del perfil, lo que previene la pérdida de materia orgánica y el cambio del color del suelo a tonos claros por la influencia de la misma. En el Contorno II, el value en húmedo de TP07 similar al de TP05, se juzga es debido a la influencia del material aportado de zonas más altas y a la humedad proporcionada para la determinación.

Estas transformaciones resultan similares a los cambios a colores claros en horizontes Ap sometidos a ensayos de remoción de suelo, reportados por Brunel y Seguel (2011); así como con los rangos de claridad antes mencionados, ya que el value de los horizontes superiores de los perfiles de referencia, determinado tanto en seco como en húmedo, corresponde a la clase de colores oscuros, mientras que en los perfiles más erosionados que los anteriores, el valor de este parámetro tiende a colores claros.

La pureza (Chroma) se expresa como denominador e indica la magnitud de la dilución que tiene el color debido a la presencia de colores grises. Para los suelos, los valores que puede tomar van desde cero para el gris neutro, hasta 8 para aquella situación tendiendo a la ausencia de gris (Jaramillo, 2002). En los horizontes superficiales de los perfiles estudiados, muestra un aumento a mayor grado de erosión; especialmente en los contornos II y III, tanto en húmedo como en seco (Figura 31).

A partir de estos resultados se observa que la transformación en esta variable ocurre principalmente en el value; cuyos valores en los horizontes superficiales, aumentan a medida que se incrementa el grado de erosión; indicando colores claros. Por lo tanto, esta variable, puede emplearse como indicador de pérdida de suelo.

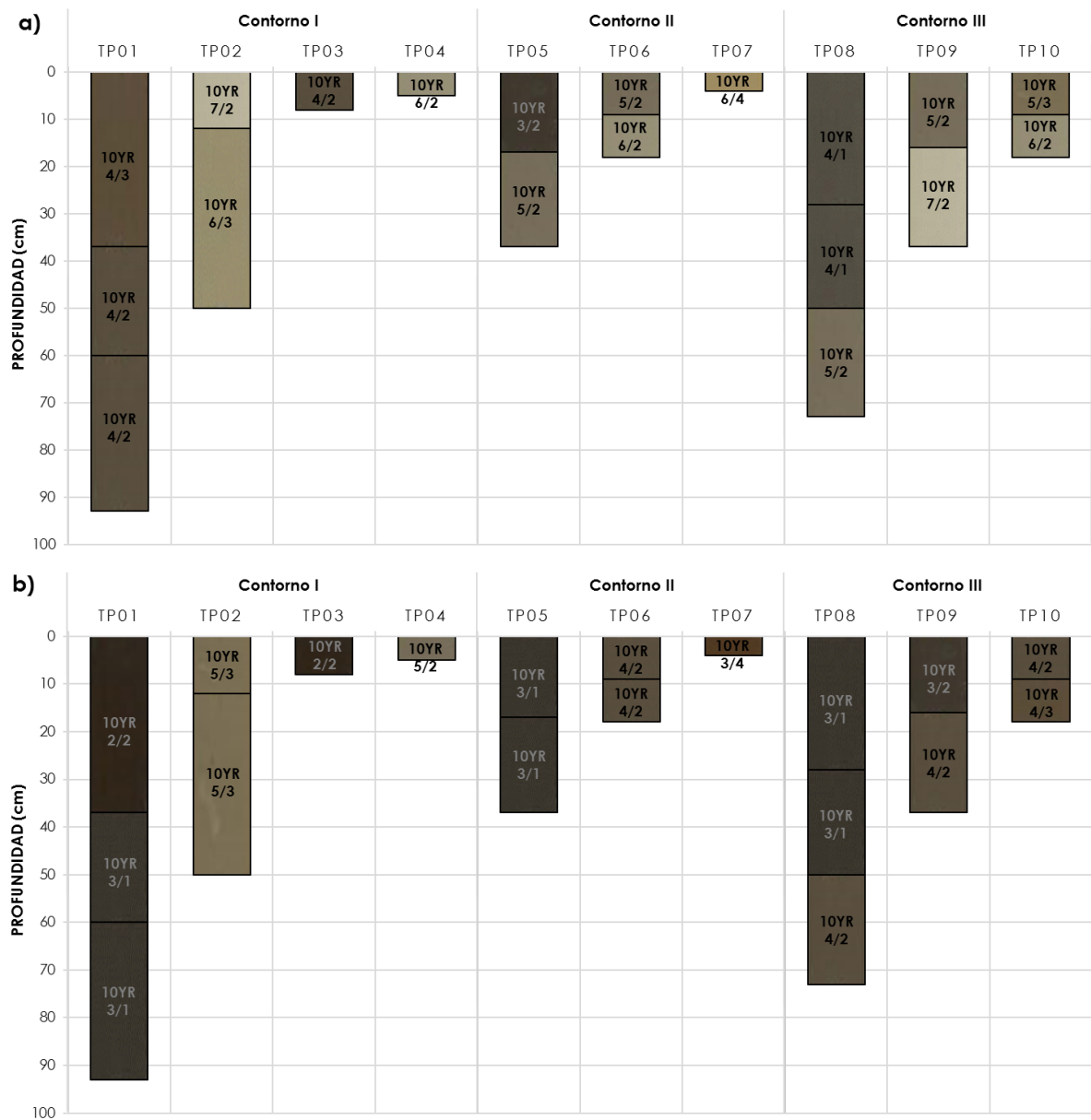


Figura 31. Color (Hue, Value, Chroma) de los perfiles estudiados.

a) en seco y **b)** en húmedo.

8.3.1.3 Estructura. La estructura de los perfiles estudiados se determinó en términos de tipo y tamaño. Ruíz *et al.*, (1999) mencionan que las estructuras granular y migajosa, son típicas de horizontes A y AB, con buenos contenidos de materia orgánica, y adecuadas para el soporte y desarrollo de vegetación, sin embargo; el tipo predominante en los tres contornos es subangular, pero también se presenta estructura en bloques en los perfiles TP05 y TP09 (Cuadro 13). De acuerdo a los mismos autores (Ruíz *et al.*, 1999), éstas suelen encontrarse en horizontes B y son un índice morfológico de la pérdida del horizonte A, lo que coincide con los horizontes presentes en los perfiles y con la presencia de erosión en diferentes grados. En TP03 la estructura es granular, no obstante, las características definidas por Ruíz *et al.* (1999) y comentadas anteriormente; difieren de las de este perfil, en el que parte del suelo está retenido debajo de las rocas que afloran en la superficie lo que se considera, previene la pérdida de materia orgánica y confiere este tipo de estructura.

El tamaño de la estructura de los perfiles (Cuadro 13), aumenta de muy pequeño, pequeño y mediano a mediano y grande conforme la profundidad es mayor, en los perfiles TP01, TP05 y TP06; sin embargo, esta variación no es constante en los tres contornos. Comparando los horizontes superiores de los perfiles de referencia con sus similares erosionados, solo se observa el incremento del tamaño de la estructura de TP01 a TP04, pero no en los perfiles intermedios; y la disminución de este parámetro de mediano y grande en TP08 a pequeño y mediano en TP10; tendencias que no coinciden entre sí.

Así, de estos resultados se determina que la estructura predominante en los suelos evaluados es la subangular; y que la transformación que se distingue en los suelos evaluados es el aumento del tamaño de la estructura, a mayor profundidad del perfil; lo que ocurre sólo en unos perfiles.

Cuadro 13. Estructura (tipo y tamaño) y sistema radicular (grosor y desarrollo) de los perfiles estudiados.

Contorno	Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	Estructura	Sistema radicular	
I	TP01	AB	0-37		††	
		B ₁	37-60		†‡	
		B ₂	60-93		†‡	
	TP02	BC	0-12		‡	
		BCD	12-50		‡	
	TP03	BCD	0-8		†	
	TP04	BCD	0-5		†	
II	TP05	AB	0-17		†††† ††††	
		BC	17-37		†‡	
	TP06	AB	0-9		††	
		BC	9-18		†	
	TP07	Capa 1	0-4		†	
	III	TP08	B	0-28		††‡‡
			B _r	28-50		†
BC			50-73		‡	
TP09		B	0-16		††	
		C	16-37		†	
TP10		BC	0-9		†	
	C	9-18		†		

Estructura: subangular muy pequeña , pequeña , mediana , grande ; granular pequeña y mediana ; bloques pequeña , mediana y grande . Sistema radicular: poco desarrollado de raíces finas †, medianamente desarrollado de raíces finas ††, poco desarrollado de raíces medias ‡, poco desarrollado de raíces finas y medias †‡, medianamente desarrollado de raíces finas y medias ††‡‡, muy desarrollado de raíces finas y grandes †††† ††††.

8.3.1.4 Sistema radicular. El sistema radicular de los perfiles estudiados se determinó en términos de grado de desarrollo y grosor de las raíces. García-Fayos (2004) explica que la erosión influye sobre la vegetación, a través del descalzamiento de las raíces, de la pérdida directa de plantas, alterando la estructura del suelo o eliminando el horizonte superficial del mismo; donde se produce la germinación de las semillas, el establecimiento de las plántulas y donde reside gran parte de la reserva de agua y nutrientes. Esto se refleja en la disminución de la densidad de raíces, con la profundidad del perfil de suelo (García-Fayos, 2004); efecto que también se observa en el grado de desarrollo del sistema radicular de los perfiles TP01, TP05, TP06, TP08 y TP09 (Cuadro 13).



Perfil TP05



Perfil TP06



Perfil TP07

Figura 32. Cambio en el desarrollo radicular de los perfiles del Contorno II.

Comparando los horizontes superficiales de cada perfil se distingue que, en el Contorno I este parámetro decrece de medio en TP01 a poco en TP04; en el Contorno II de muy a poco desarrollado en TP05 y TP07 respectivamente (Figura 32); y en el Contorno III varía de desarrollo medio en TP08 a poco desarrollado en TP10 (Cuadro 13). De acuerdo a Valdés (2010), las raíces son de gran importancia en el control de la erosión, ya que forman una especie de malla que protege al suelo del desprendimiento de partículas; por lo que entre mayor cantidad de éstas se encuentren, más protegido está el mismo; lo que concuerda con la reducción del desarrollo radicular en los horizontes superiores, de los perfiles de referencia hacia los de mayor erosión.

El grosor de las raíces encontradas es fino y medio, principalmente. Los perfiles que exhiben un cambio en este parámetro, con respecto a la profundidad, son TP01, TP05 y TP08, sin embargo; la variación no es clara ya que, en TP01 las raíces son finas en el horizonte AB y finas y medias en B1 y B2; en TP05 horizonte AB las raíces son finas y grandes, mientras que en BC, éstas son finas y medias; y en TP08 el grosor de las mismas es fino y medio en el horizonte B, fino en B₁ y medio en BC. Considerando solo los horizontes superficiales de cada perfil, se percibe la disminución del grosor de las raíces a mayor grado de erosión, en los contornos II y III (Cuadro 13).

De acuerdo con estos resultados, el parámetro en el que se refleja principalmente la transformación que ocurre en los perfiles, conforme la pérdida de suelo es mayor; es el grado de desarrollo del sistema radicular en los horizontes superficiales; el que disminuye de los perfiles de referencia a los más erosionados, por lo que éste puede ser empleado como indicador de erosión.

8.3.1.5 Contenido de gravas, piedras y rocas. En los suelos estudiados, a medida que el grado de erosión se incrementa, se encuentra material rocoso de mayor tamaño, y el porcentaje de éste dentro del perfil aumenta, es decir, de los perfiles de referencia hacia los más erosionados. El aumento de gravas, piedras y rocas con respecto a la profundidad se puede observar en los perfiles TP01, TP05, TP06 y TP09. En el primero se incrementa el contenido de gravas de 5 a 10%, en el segundo aumenta el porcentaje de gravas y piedras de 0% a 5 y 10% respectivamente, en TP06 esta tendencia se observa al variar el contenido de rocas de 5% en AB a 10% en BC; y en TP09 se encuentra 5% de rocas las que aumentan a 10% a mayor profundidad (Figura 33). Examinando los horizontes superficiales, se percibe con más claridad el aumento del porcentaje de gravas, piedras y rocas a mayor grado de erosión. En el Contorno I, el contenido de éstas cambia de 5% de gravas en TP01 a 30% tanto de gravas como de piedras y 15% de rocas en TP04. En el Contorno II, se encuentra 0% de estos fragmentos en TP05, mientras que TP06 presenta 25% de gravas, 10% de piedras y 5% de rocas; en este caso se considera que TP07, perfil con grado de erosión muy severa; no contienen gravas, piedras ni rocas ya que se compone de dos capas de roca poco alterada. En el Contorno III, el porcentaje de gravas se encuentra entre 15 y 20%; y 5% entre piedras y rocas en el perfil TP08; mientras que en TP10 el porcentaje de éstas es de 25, 10 y 5% respectivamente (Figura 33).

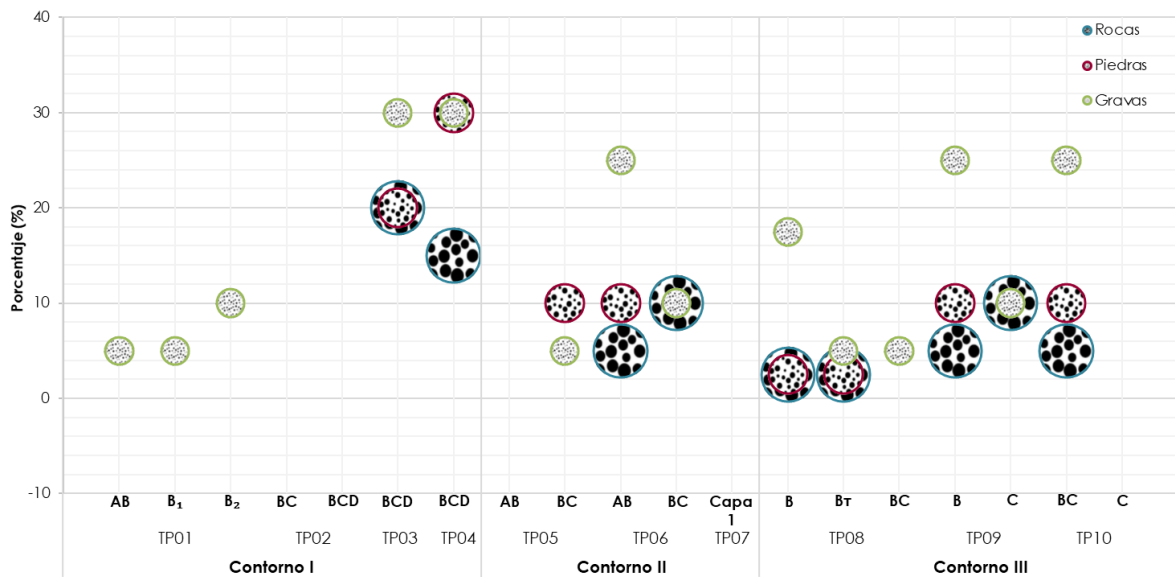


Figura 33. Contenido de gravas, piedras y rocas de los perfiles estudiados.

Figura elaborada con gráficos tomados de USDA (1999).

El aumento de estos fragmentos en los perfiles más erosionados se considera relacionado con la selectividad del proceso de erosión ya que, como lo mencionan Do Prado y Da Veiga, (1993); éste actúa arrastrando las partículas más finas del suelo, dejando las más gruesas y pesadas; y coincide con el incremento del contenido de gravas en una estepa arbustiva degradada, donde la erosión era más intensa en comparación con otras estepas herbáceas arbustivas, resultados reportados por Chartier y Rostagno (2006) y por Chartier *et al.* (2013); por lo que en este caso, dicho incremento observado principalmente en los horizontes superficiales; se juzga hace referencia al proceso de erosión en curso y puede ser empleado como indicador del mismo.

Como conclusión preliminar, se determina que en general las variaciones de las características morfológicas del suelo, con respecto al grado de erosión; se perciben fácilmente en campo. Estas transformaciones ocurren como consecuencia de la pérdida de la masa superficial del suelo, lo que ocasiona la disminución de la profundidad de los perfiles de referencia hacia los más erosionados, colores más claros del suelo, la reducción del grado de desarrollo del sistema radicular, y la acumulación relativa de gravas, piedras y rocas; a mayor pérdida de material. Por lo tanto, estas características pueden ser recomendadas como indicadores de la erosión de los suelos.

8.3.2 Características físicas

8.3.2.1 Textura. La textura predominante en el Contorno I es franco arcillosa, encontrada tanto en los perfiles TP01 y TP02 con grado de erosión moderado y fuerte respectivamente, como en TP04 con erosión muy fuerte. La textura franco arcillo arenosa sobresale en el Contorno II y cambia a franco arenosa en el perfil TP07 que se compone de capas de roca y cuya erosión es muy severa. En el Contorno III, perfiles TP08 y TP09, predomina la textura arcillosa y franca en TP10 con erosión muy fuerte (Cuadro 14).

Como se mencionó anteriormente, el proceso de erosión actúa arrastrando las partículas más finas del suelo, como la arcilla y materia orgánica; dejando las más gruesas y pesadas (Do Prado y Da Veiga, 1993). Los resultados del contenido de arcilla, limo y arena difieren respecto a lo anterior ya que; en el caso de la fracción arcilla, el porcentaje de ésta en los horizontes superiores de los tres contornos, muestra una tendencia a incrementarse, al aumentar el grado de erosión (Figura 34) sin embargo, estos resultados coinciden con el registro de una textura más fina al aumentar la degradación del suelo de una estepa herbácea con arbustos a una estepa arbustiva degradada, reportado por Chartier y Rostagno (2006) y por Chartier *et al.* (2013); así como con el mayor contenido de arcilla (33%) en pastizales con alta intensidad de pastoreo, en comparación con pastizales con pastoreo de baja intensidad (18% de arcilla), resultados reportados por van Oudenhoven *et al.* (2015).

Respecto a la fracción limo, el porcentaje de ésta en el Contorno I disminuye a medida que aumenta la profundidad de los perfiles y a mayor pérdida de suelo en los horizontes superiores; en el Contorno II, presenta la tendencia opuesta a los perfiles del primer contorno, al incrementarse su contenido en ambos casos; y en el Contorno III, los valores de limo no presentan variación que se considere relacionada con el grado de erosión (Figura 34).

El cambio en el contenido de arena en los perfiles del Contorno I es tenue; en el segundo Contorno esta fracción disminuye a mayor profundidad de los perfiles TP05 y TP06 y el perfil más erosionado (TP07), presenta un incremento con respecto a TP06; en el último Contorno, el porcentaje de arena de los horizontes superiores exhibe una disminución, conforme el grado de erosión es mayor (Figura 34).

Cuadro 14. Textura de los perfiles estudiados.

Contorno	Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	Textura
I	TP01	AB	0-37	franco
		B ₁	37-60	franco
		B ₂	60-93	franco arcilloso
	TP02	BC	0-12	franco arcilloso
		BCD	12-50+	franco arcilloso
	TP03	BCD	0-8	franco arenoso
	TP04	BCD	0-5	franco arcilloso
II	TP05	AB	0-17	franco arcillo arenoso
		BC	17-37	franco arcillo arenoso
	TP06	AB	0-9	franco arcillo arenoso
		BC	9-18	franco
	TP07	Capa 1	0-4	franco arenoso
III	TP08	B	0-28	franco arcillo arenoso
		Br	28-50	arcilloso
		BC	50-73	arcilloso
	TP09	B	0-16	arcilloso
		C	16-37	franco arenoso
	TP10	BC	0-9	franco
C		9-18	franco	

Se considera que estas variaciones en los porcentajes de arena, limo y arcilla, con respecto al grado de erosión; se deben a que con el método de Bouyoucos empleado para esta determinación, no se eliminan cementantes como carbonatos (SEMARNAT, 2002); cuyo tamaño puede variar entre 0.002 y 2mm (Jaramillo, 2002); y mediante el cual se pueden sobreestimar los valores del porcentaje de arena y arcilla (Krasilnikov *et al.*, 2013).

Por lo tanto, los cambios que presenta este parámetro en los diferentes perfiles estudiados, incluyendo aquellos en los porcentajes de las fracciones arena, limo y arcilla, son muy variables por lo que no se considera su uso como indicador de los procesos de erosión y/o desertificación.

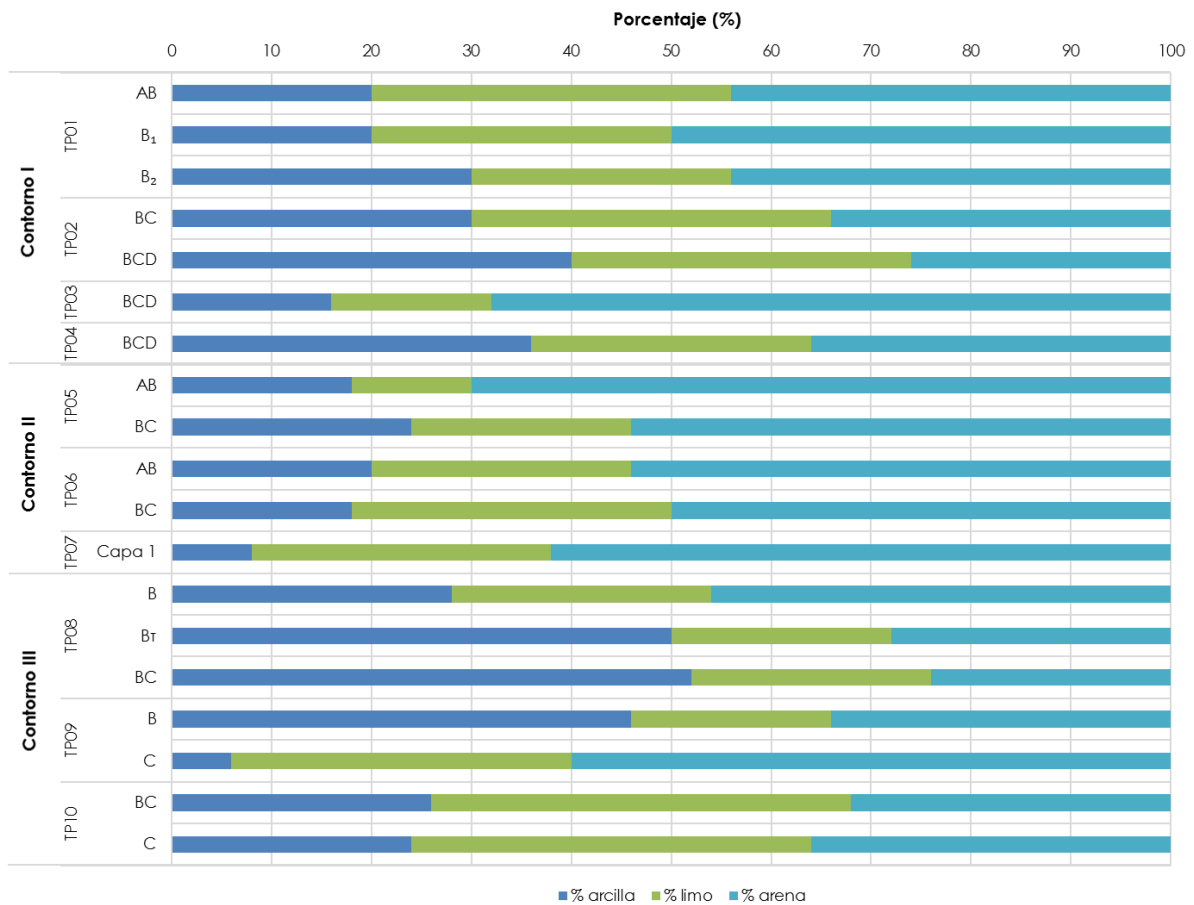


Figura 34. Porcentaje de arcilla, limo y arena de los perfiles estudiados.

8.3.2.2 Plasticidad. Los suelos de los Contornos I y II son, en su mayoría, ligeramente plásticos. En el Contorno III, los perfiles TP08 y TP09 tienden a ser más plásticos que en los contornos anteriores (Cuadro 15). La plasticidad, entre otras cosas, se relaciona con el contenido y tipo de arcilla (Ruíz *et al.*, 1999); y tomando en cuenta que en el proceso de erosión son arrastradas partículas finas como las de ésta última (Do Prado y Da Veiga, 1993); se observa que en este caso, no hay variación de la plasticidad que se relacione con la pérdida de suelo; ya que sólo se aprecia que los perfiles más erosionados de los contornos I y II (TP07 y TP10) así como TP02 con erosión fuerte, no presentan plasticidad; sin embargo, éste último a diferencia de TP07 y TP10, no es el perfil de mayor grado de erosión del Contorno I. Considerando únicamente los horizontes superficiales, en los Contornos II y III se aprecia la disminución de éste parámetro, del perfil de referencia al de mayor erosión. De esta manera se observa que, de la misma forma que con la textura, los cambios en este parámetro físico son muy variables, por lo que no se considera éste para emplearse como indicador de la pérdida de suelo.

Cuadro 15. Plasticidad y densidad aparente de los perfiles estudiados.

Contorno	Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	DA (g/cm ³)	Plasticidad	
I	TP01	AB	0-37	1.17	ligeramente plástico	
		B1	37-60	1.13	ligeramente plástico	
		B2	60-93	1.29	muy plástico	
	TP02	BC	0-12	1.13	no plástico	
		BCD	12-50+	1.09	no plástico	
	TP03	BCD	0-8	1.28	plástico	
	TP04	BCD	0-5	1.04	ligeramente plástico	
II	TP05	AB	0-17	1.17	ligeramente plástico	
		BC	17-37	1.25	ligeramente plástico	
	TP06	AB	0-9	1.14	ligeramente plástico	
		BC	9-18	1.06	ligeramente plástico	
	TP07	Capa I	0-4	1.18	no plástico	
	III	TP08	B	0-28	1.09	plástico
			Br	28-50	1.20	muy plástico
BC			50-73	1.20	plástico	
TP09		B	0-16	1.15	muy plástico	
	C	16-37	1.16	no plástico		
TP10	BC	0-9	1.14	no plástico		
	C	9-18	1.10	no plástico		

DA: Densidad aparente

8.3.2.3 Densidad aparente. En algunos de los suelos estudiados, la densidad aparente disminuye a mayor profundidad del perfil, como en TP02, TP06 y TP10 cuyos grados de erosión son fuerte en el primero, y muy fuerte en los últimos; al contrario, en los tres perfiles de referencia TP01, TP05, TP08 y en TP09 con erosión fuerte a muy fuerte, los valores de esta variable aumentan (Cuadro 15); lo que se considera tiene relación con la naturaleza de los horizontes más profundos ya que al encontrarse suelos compactos, la densidad aparente se incrementa (Jaramillo, 2002). Se ha reportado que, como resultado de la pérdida de materia orgánica y el incremento en el contenido de arcilla, producto de la erosión; la estabilidad de la estructura disminuye, afectando la porosidad del suelo e induciendo un incremento de la densidad aparente (Brunel y Seguel, 2011). Considerando sólo los horizontes superiores, en los perfiles del Contorno III se observa un comportamiento similar; ya que la densidad aparente y el porcentaje de arcilla exhiben un incremento conforme la erosión aumenta (Cuadro 15 y Figura 34); resultados que

coinciden con la mayor densidad aparente en una estepa arbustiva degradada, en comparación con otras comunidades vegetales, reportado por Chartier y Rostagno (2006). Por el contrario, los valores de densidad disminuyen en los Contornos I y II, a medida que la pérdida de suelo es mayor (Cuadro 15), tendencia que resulta similar a lo reportado por van Oudenhoven *et al.* (2015) donde el suelo en un pastizal con pastoreo de baja intensidad presento 1.3 g cm^{-3} de densidad aparente mientras que la densidad en un pastizal con alta intensidad de pastoreo fue de 1.2 g cm^{-3} . Por lo tanto, se determina que las transformaciones que sufre este parámetro en los suelos examinados, los que presentan diversos grados de erosión; no se consideran para su uso como indicadores, ya que la tendencia de los cambios difiere entre Contornos.

Como conclusión preliminar se establece que, a pesar de que se muestran variaciones en la textura, plasticidad y densidad aparente en los suelos con diversos grados de erosión; en general estas transformaciones son tenues, se presentan sólo en algunos perfiles y el comportamiento con respecto al grado de erosión es variable.

8.3.3 Características químicas

8.3.3.1 pH. El pH de los perfiles estudiados varía de moderadamente ácido (5.1-6.5) a medianamente alcalino (7.4-8.5) (SEMARNAT, 2002), siendo el primero el que se presenta en menos casos. Los perfiles de referencia presentan pH moderadamente ácido a neutro; mientras que, en los más erosionados, este parámetro tiende a ser medianamente básico. Esta variación también se percibe al comparar los horizontes superficiales de los perfiles; en el Contorno I el pH cambia de 6.3 en TP01 a 7.5 en TP04; en el Contorno II, de 5.2 en TP05 a 7.3 en TP07; y en el último Contorno, de 7.2 en TP08 a 7.5 en TP10 (Figura 35); es decir que, esta variable se incrementa hacia pH básico, a medida que la pérdida de suelo es mayor. En el Contorno I, a pesar de que el valor de pH de TP03 no sigue la tendencia de aumento a mayor grado de erosión, su valor sigue siendo más alto que el de TP01; a diferencia del Contorno II en el cual, el pH de TP09 es más bajo que el de TP08, con menor erosión. Los suelos básicos son comunes en regiones áridas y semiáridas ya que, cuando la evapotranspiración potencial es mayor que la precipitación se genera un déficit de agua en el suelo y no hay lavado de bases y/o sales, sino que éstas se acumulan (Jaramillo, 2002), y los suelos se alcalinizan (pH entre 7.0 y 8.5) (SAGARPA, 2012). Lo anterior, junto con los resultados de pH de los suelos estudiados, valores que en general tienden a la alcalinidad y los que son mayores en los suelos más erosionados; sugieren escasez de precipitaciones en la zona de estudio; además de degradación del suelo por alcalinización (SEMARNAT, 2013). De esta manera,

los cambios en el pH de los suelos estudiados pueden relacionarse con la desertificación, al hacer referencia a características que favorecen este proceso; y por lo tanto esta característica puede emplearse como indicador de desertificación.

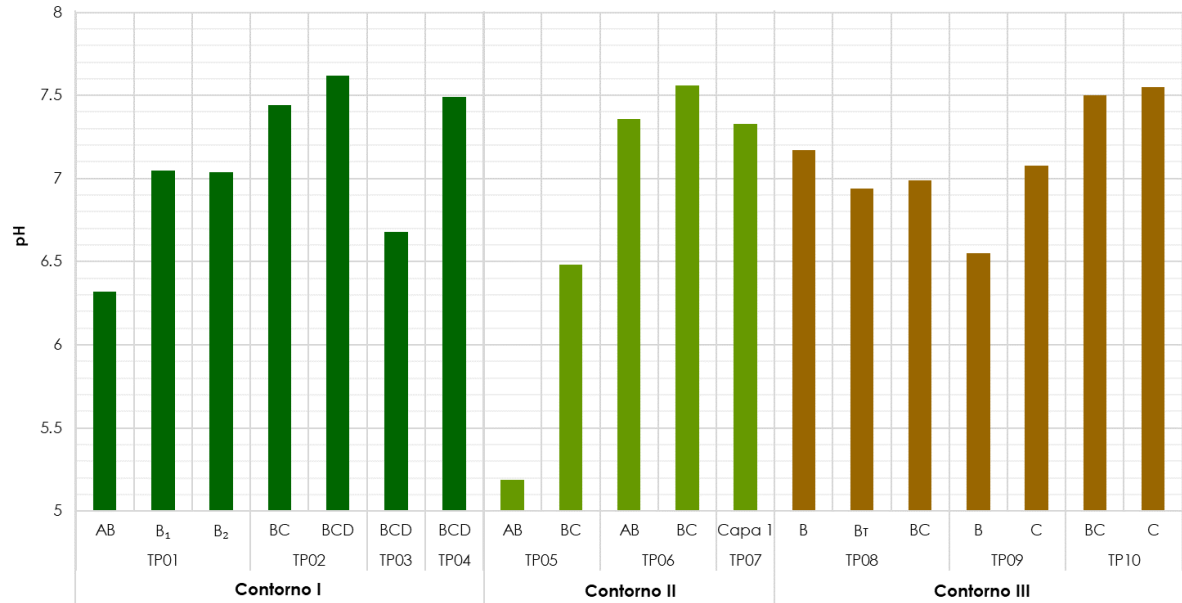


Figura 35. pH de los perfiles estudiados.

8.3.3.2 Carbonato de calcio. Los resultados de la evaluación del contenido de carbonato de calcio equivalente, en los suelos estudiados, se muestran en la Figura 36. En los perfiles TP01, TP05, TP06, TP09 y TP10, éste se incrementa a mayor profundidad. Comparando el contenido de carbonatos de calcio en los horizontes superiores, se observa que domina la tendencia a aumentar el porcentaje de éste, conforme la pérdida de suelo es mayor. Los valores varían en el Contorno I de 1.4 a 14.0% en los perfiles TP01 y TP04 respectivamente; en el Contorno II de 0.0% en TP05 a 1.2% en TP07; y en el Contorno III de 1.0% en TP08 a 3.0% en TP10 (Figura 36). El incremento del porcentaje de carbonatos de calcio a mayor grado de erosión; sugiere la influencia de la roca por encontrarse más cerca de la superficie de los perfiles, debido a la pérdida de suelo que deja a los horizontes que normalmente se desarrollan en el interior del perfil, expuestos en la superficie. Asimismo, se considera influye que, entre los componentes inorgánicos de los materiales parentales del suelo, se encuentran los carbonatos de calcio; los que pueden estar presentes en el suelo, si éste no ha evolucionado lo suficiente o si han sido resistentes a la acción de los procesos de alteración (Jaramillo, 2002); y en regiones áridas y semiáridas, contribuyen también las bajas precipitaciones (SEMARNAT, 2002). De

esta manera, se considera que el contenido de carbonato de calcio equivalente en los suelos evaluados puede relacionarse con la erosión y la desertificación; al incrementarse éste en los horizontes superficiales más erosionados y al hacer referencia a características que contribuyen al proceso de desertificación. Por lo tanto, esta variable, se sugiere como indicador tanto del proceso de erosión como de desertificación.

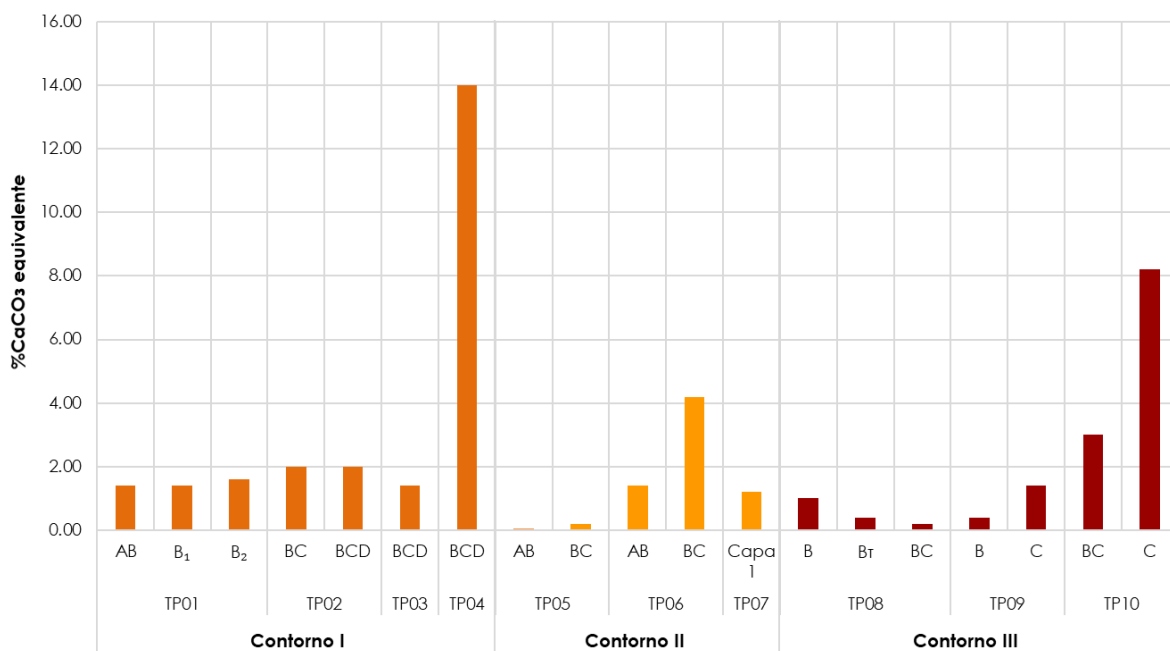


Figura 36. Porcentaje de carbonato de calcio equivalente de los perfiles estudiados.

8.3.3.3 Materia orgánica. El contenido de materia orgánica de los suelos estudiados muestra una disminución evidente a mayor profundidad del perfil, la que, de acuerdo a Jaramillo (2002) ocurre normalmente; como en TP01, TP02, TP05, TP06 y en los tres perfiles del último contorno. Asimismo, la pérdida de materia orgánica por el arrastre de partículas finas del suelo es producto de la erosión como lo mencionan Do Prado y Da Veiga (1993); y Brunel y Seguel (2011); misma tendencia que se observa en los horizontes superiores de los tres contornos, al disminuir este parámetro, conforme el grado de erosión aumenta. En el Contorno I, exceptuando el perfil TP03, el porcentaje de materia orgánica cambia de 2.7% en TP01 a 1.1% en TP04; en el Contorno II varía de 2.4% en el perfil de referencia TP05 a 0.3% en TP07 con erosión muy severa; y en el Contorno III, de 4 a 1.6%, en los perfiles TP08 y TP10 respectivamente (Figura 37). Como se menciona anteriormente, parte del suelo del perfil TP03 se encuentra protegido de la acción de factores climáticos; por lo que su contenido de materia orgánica (3%) resulta similar al del perfil TP01, con menor

grado de erosión. Estos resultados resultan similares a lo registrado por van Oudenhoven *et al.* (2015), ya que reportan que los contenidos de materia orgánica del suelo fueron generalmente más bajos en pastizales con pastoreo de alta intensidad en comparación con zonas con pastoreo de baja intensidad; además de mostrar una correlación negativa considerable entre dicha variable y la pérdida de suelo. Chartier *et al.* (2013), reportan una situación similar, al registrar los valores medios más altos de carbono orgánico en una estepa herbácea arbustiva, en comparación con una estepa degradada.

A partir de estos resultados se observa que las transformaciones ocurridas en el porcentaje de materia orgánica de los perfiles estudiados, percibida al disminuir el contenido de ésta a mayor grado de erosión; permiten relacionar dicha variable con la pérdida de suelo y, por lo tanto, proponerla como indicador de dicho proceso.

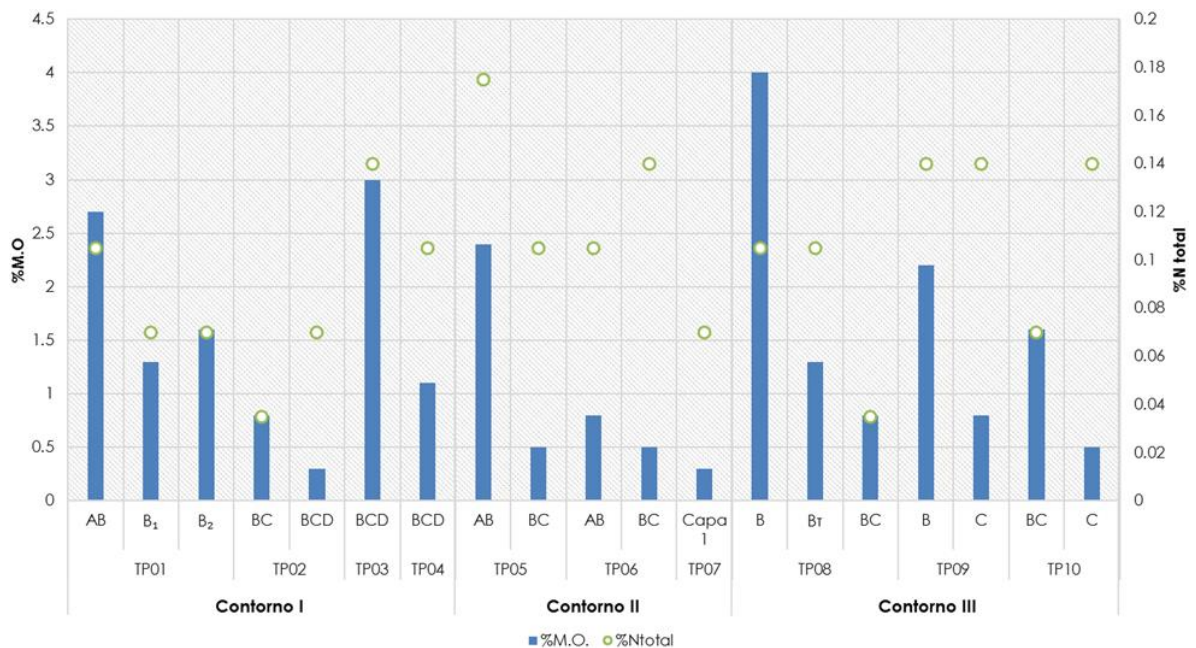


Figura 37. Porcentaje de materia orgánica y nitrógeno total de los perfiles estudiados.

8.3.3.4 Nitrógeno total. El porcentaje de nitrógeno total en los suelos estudiados varía de 0.035 a 0.175% (Figura 37). Debido a que la mayor parte del nitrógeno en el suelo está en combinación con la materia orgánica, las pérdidas de éste por erosión suelen ser importantes (Chela, 2008). En este caso, se percibe la reducción del mismo, en los horizontes superficiales del Contorno II, es decir, de los perfiles de referencia hacia sus similares más erosionados. Sin embargo, en los Contornos I y III,

el porcentaje de nitrógeno disminuye en unos casos como entre los perfiles TP01 y TP02, y en otros aumenta como entre TP08 y TP09; es decir que el comportamiento de esta variable en los horizontes superiores de estos Contornos no es similar. Respecto a la profundidad, solo en los perfiles de referencia (TP01, TP05 y TP08), los valores de este parámetro disminuyen (Figura 37). Brunel y Seguel (2011) mencionan un ensayo en el cual, con la extracción de 20 cm de suelo superficial, la concentración de carbono total descendió respecto al testigo sin erosión; y el nitrógeno presentó la misma tendencia. Asimismo, Chartier *et al.* (2013), reportan valores medios más altos de nitrógeno total en una estepa herbácea arbustiva, en comparación con una estepa degradada; resultados que estuvieron correlacionados positivamente con el contenido de carbono orgánico. Lo anterior no ocurre en los suelos estudiados, a pesar de que el contenido de materia orgánica de los mismos exhibe una notable reducción a mayor grado de erosión; en este caso, la variación en el contenido de nitrógeno no sigue una misma tendencia en los perfiles; por lo que no se considera esta variable para su uso como indicador de los procesos de erosión y/o desertificación.

8.3.3.5 CIC y bases intercambiables. El valor menor de CIC encontrado en los perfiles estudiados es $11.4 \text{ Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ y el mayor $38.6 \text{ Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$, en TP01 y TP08 respectivamente (Figura 38). La CIC está muy asociada al contenido de materia orgánica, tipo y contenido de arcilla (SAGARPA, 2012). Respecto a la profundidad, se observa el aumento de los valores de esta variable en los horizontes inferiores de los perfiles TP01, TP02, TP05, TP06, TP08 y TP09. En los horizontes superiores de los Contornos I y II, los valores de esta variable son mayores a medida que el grado de erosión se incrementa; los $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en los perfiles de referencia son 11.4 en TP01 y 14.0 en TP05, mientras que en sus similares más erosionados, los valores de CIC son de 22.6 en TP04 y 21.8 en TP07 (Figura 38); lo que sugiere la relación con el incremento del porcentaje de arcilla de los mismos a mayor pérdida de suelo. Al contrario, en el Contorno III, este parámetro disminuye a mayor pérdida de suelo; de $23.6 \text{ Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en TP08 a $22.8 \text{ Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en TP10; por lo que se asocian estos resultados con la pérdida de materia orgánica, resultado de la erosión. De esta manera, se percibe que el comportamiento de esta variable, con respecto al grado de erosión, difiere entre los Contornos evaluados.

El contenido de calcio y magnesio en los perfiles evaluados presentan un comportamiento similar. En ambos casos, los $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ no muestran variación con respecto a la profundidad, que se relacione con la pérdida de suelo ni que se presente en los tres contornos. Considerando los horizontes superiores, se percibe la tendencia a incrementarse el contenido de calcio, de los perfiles de referencia a los más erosionados.

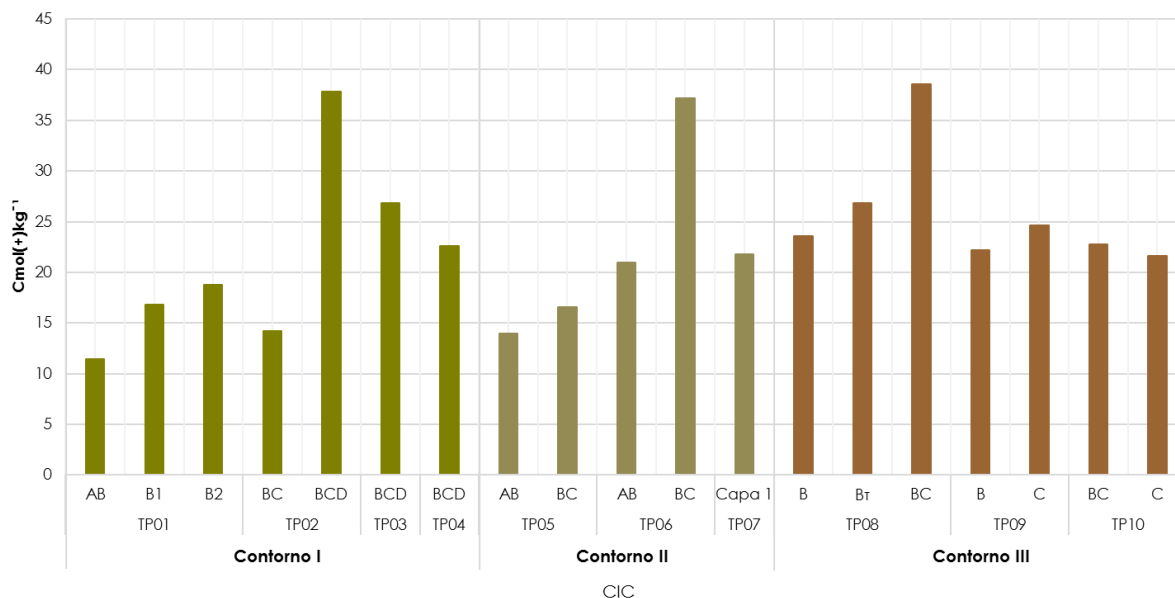


Figura 38. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los perfiles estudiados.

En el caso del magnesio, este aumento se presenta en el contorno II y en los perfiles TP01, TP02, TP08 y TP09 de los Contornos I y III (Figura 39). La composición química del material parental que origina el suelo define, en buena medida, los nutrientes y otros elementos que pueden pasar a él (Jaramillo, 2002), por lo que, a pesar de la inconsistencia de los cambios en estas variables; se considera la influencia de la roca madre en el aumento del contenido de calcio y magnesio; conforme se incrementa la pérdida de suelo, la que deja el material parental más cerca de la superficie. A diferencia de los suelos desarrollados bajo condiciones de precipitación abundante, donde puede haber pérdida de bases por efecto de la lixiviación y por extracción de los cultivos; el calcio es un elemento relativamente abundante en regiones semiáridas (SAGARPA, 2012); por lo que su alto contenido (SEMARNAT, 2002) en los suelos estudiados, se considera hace referencia a condiciones de bajas precipitaciones; las que hacen a la zona de estudio, propensa a la desertificación. Asimismo, se piensa que las transformaciones en el contenido de magnesio, observadas en el incremento de éste a mayor pérdida de suelo, se relacionan con el grado de erosión del mismo.

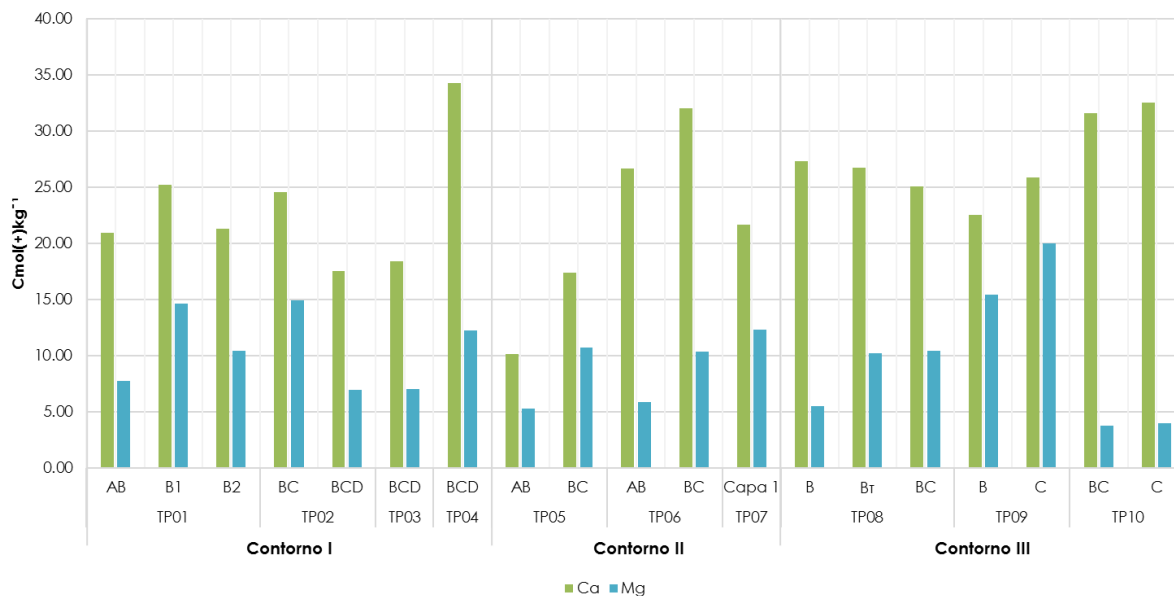


Figura 39. Contenido de calcio (Ca) y magnesio (Mg) de los perfiles estudiados.

El contenido de sodio aumenta con respecto a la profundidad de los perfiles en los Contornos II y III; a diferencia del contenido de potasio que disminuye en el Contorno III (Figura 40). Considerando los horizontes superficiales, en general, los contenidos tanto de sodio como de potasio no muestran variación que se relacione con el grado de erosión, ni la que se presente en los tres contornos; excepto los $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ de potasio, para dichos horizontes, en el Contorno II (Figura 40). En este último caso se considera que, de la misma forma que con la CIC; el incremento de éste se relaciona con el aumento del porcentaje de la fracción arcilla en dichos horizontes, a mayor grado de erosión; ya que el potasio intercambiable, generalmente está ubicado en el entorno de las arcillas (SAGARPA, 2012); sin embargo, este cambio no concuerda con el efecto del proceso de erosión que es el arrastre de partículas finas del suelo, mencionado por Do Prado y Da Veiga (1993). Por otra parte, el contenido de potasio de los perfiles evaluados, se encuentran entre 0.03 y 0.92 $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$, dominando los valores muy bajos (<0.2) (SEMARNAT, 2002; SAGARPA, 2012), resultados que indican la falta de este nutriente. El sodio puede causar la formación de costras, destrucción de la estructura del suelo y reducción de la porosidad del mismo, acelerando los problemas de erosión hídrica (SAGARPA, 2012); sin embargo, los suelos estudiados presentan valores de sodio de 0.13 a 0.66 $\text{Cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ es decir, muy bajos a normales (SAGARPA, 2012); y como se mencionó anteriormente, dichos parámetros no muestran una variación clara que se pueda relacionar con la incidencia de los procesos de erosión o desertificación.

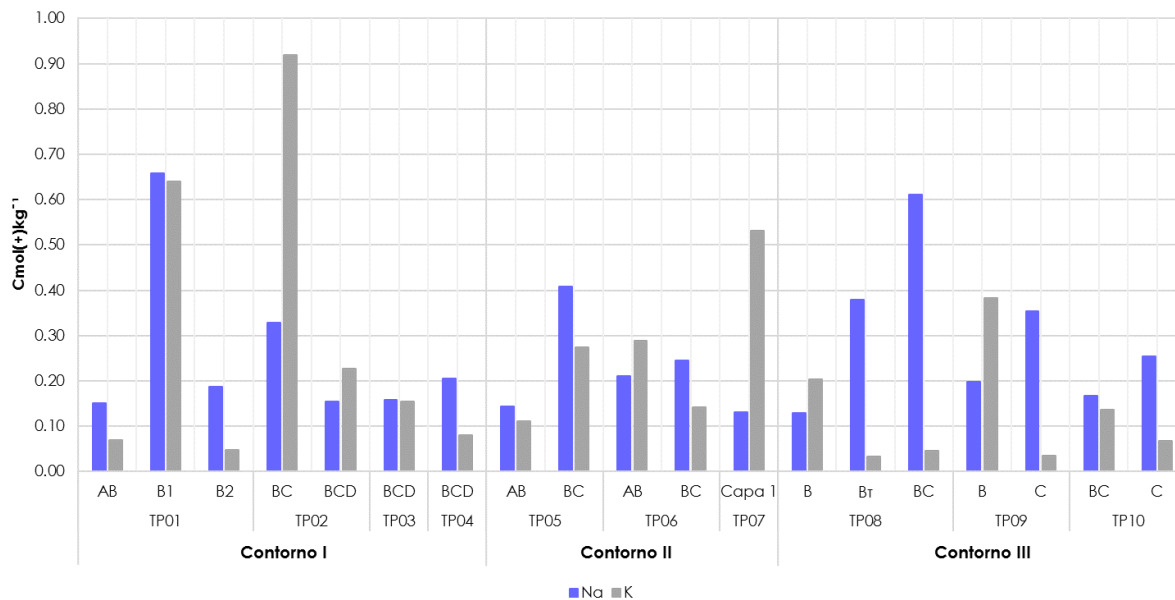


Figura 40. Contenido de sodio (Na) y potasio (K) de los perfiles estudiados.

Como conclusión preliminar se expone que, las transformaciones de las características químicas observadas entre los perfiles de referencia y los erosionados, en específico, la disminución en el contenido de materia orgánica, el incremento del carbonato de calcio equivalente, magnesio y calcio; y la variación de pH moderadamente ácido a medianamente alcalino; permiten considerarlas para su uso como indicadores para la alerta de la erosión y desertificación.

8.3.4 Características biológicas

8.3.4.1 Actividad de la deshidrogenasa. Los resultados de la determinación de la actividad de la deshidrogenasa se muestran en el Cuadro 16, junto con los valores de la relación carbono/nitrógeno (C/N) de cada suelo estudiado. Los μg de TTF/g de suelo en cada perfil, varían de forma similar tanto en la evaluación con glucosa como sin ésta; pero no muestran cambios con respecto al mayor o menor grado de erosión de los perfiles; solo en el Contorno III, se observa que este parámetro se modifica a medida que cambia la relación C/N; sugiriendo una relación proporcional entre estas variables (Cuadro 16). Por lo tanto, los cambios percibidos en la actividad de la deshidrogenasa, en suelos bajo diferentes grados de erosión, no muestran relación con dicho proceso ni denotan condiciones que contribuyan al proceso de desertificación, ya que las variaciones no son consistentes en los tres Contornos.

Cuadro 16. Actividad de la deshidrogenasa y relación Carbono/Nitrógeno de los perfiles estudiados.

Contorno	Perfil	DHA	GDHA	C/N
		(µg de TTF/g de suelo en 24 h)		
I	TP01	0.79	1.06	14.86
	TP02	0.62	0.32	13.37
	TP03	2.18	4.62	12.26
	TP04	0.13	0.84	5.94
II	TP05	0.24	0.21	8.02
	TP06	1.53	2.43	4.46
	TP07	0.87	1.66	2.23
III	TP08	1.25	2.65	22.29
	TP09	0.08	0.30	8.91
	TP10	0.84	1.09	13.37

DHA: Deshidrogenasa, GDHA: Glucosa deshidrogenasa, TTF: Trifenil-formazan, C/N: Relación Carbono/Nitrógeno.

8.3.4.2 Conteo de microorganismos. Los microorganismos determinados fueron bacterias mesófilas aerobias (BMA), Gram negativas, actinomicetos y hongos. El número de colonias (UFC/g) de BMA y actinomicetos, en los tres contornos, tiende a aumentar a medida que se incrementa el grado de erosión de los perfiles (Figuras 41 y 43). En el caso de las primeras, el número de colonias en TP02 y TP07 es un poco más bajo que los perfiles anteriores en grado de erosión; y para los segundos, este parámetro disminuye en TP04 y TP07. Estos resultados se relacionan con el pH neutro a medianamente alcalino de los suelos más erosionados ya que la actividad de las bacterias y actinomicetos aumenta bajo condiciones neutras (SAGARPA, 2012); y en el caso de los actinomicetos también se considera la influencia de su capacidad para tolerar la sequía (Margulis *et al.*, 2014).

El número de colonias (UFC/g) de bacterias Gram negativas, a diferencia de las BMA y los actinomicetos, se reduce a medida que el grado de erosión es mayor (Figura 42); en este caso se piensa que influye el contenido de materia orgánica, que disminuye a mayor pérdida de suelo ya que, entre otros organismos en el suelo, las bacterias están relacionados con el contenido de humus (SAGARPA, 2012).

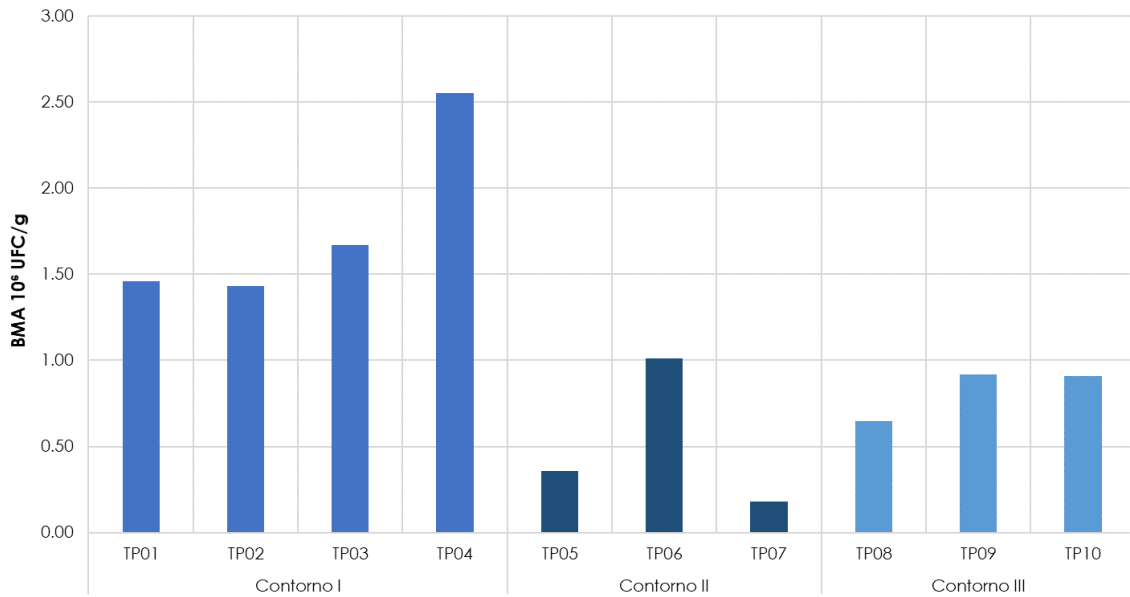


Figura 41. Unidades formadoras de colonias de Bacterias mesófilas aerobias, por gramo de suelo de los perfiles estudiados.

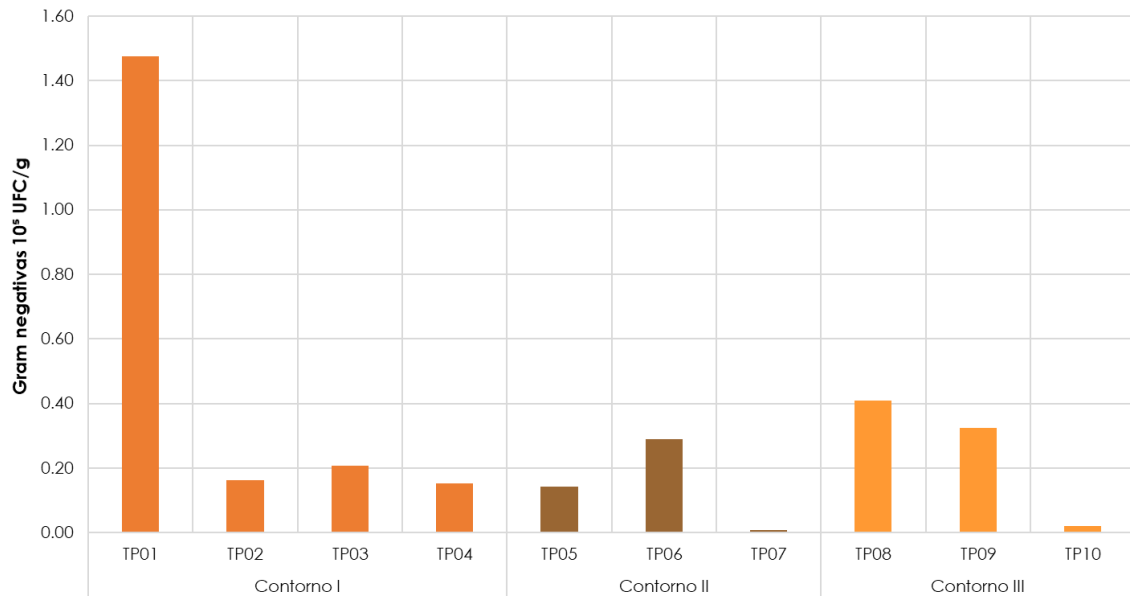


Figura 42. Unidades formadoras de colonias de Gram negativas, por gramo de suelo de los perfiles estudiados.

Los resultados del conteo de hongos se muestran en la Figura 44. Este parámetro varía en el Contorno I, de 0.56 a 1.52 X 10⁴ UFC/g en TP01 y TP04 respectivamente. En el Contorno II el perfil TP05 presenta 0.35 X 10⁴ UFC/g de los mismos y 0.77 X 10⁴

UFC/g en TP06; mientras que en el Contorno III el número de colonias en TP08 es de 0.69 y en TP10 0.85×10^4 UFC/g.

Los hongos muestran un comportamiento similar a las BMA y actinomicetos, al aumentar el número de colonias de los perfiles de referencia a sus similares más erosionados. Los hongos edáficos se adaptan a una amplia gama de pHs, aunque la mayor parte de ellos prosperan mejor en suelos ácidos, no tanto por el pH sino por la reducida competencia con bacterias y actinomicetos (Margulis *et al.*, 2014); todo lo cual se considera está influyendo en su incremento a mayor pérdida de suelo. En todos los casos de conteo de microorganismos, el perfil con erosión muy severa presenta los valores más bajos.

A partir de los resultados del conteo de microorganismos se observa que la variación en el número de colonias (UFC/g) de BMA y actinomicetos, es decir el aumento de éstas, se puede relacionar con la escasez de precipitaciones en la zona de estudio; y el cambio en los valores de UFC/g de los hongos, es decir, la disminución del número de colonias; también puede hacer referencia a condiciones de sequía y de alcalinidad, que favorecen la presencia de actinomicetos pues estos resultan muy poco tolerantes a la acidez (Margulis *et al.*, 2014); y las que contribuyen a la degradación del suelo y al proceso de desertificación (SEMARNAT, 2013).

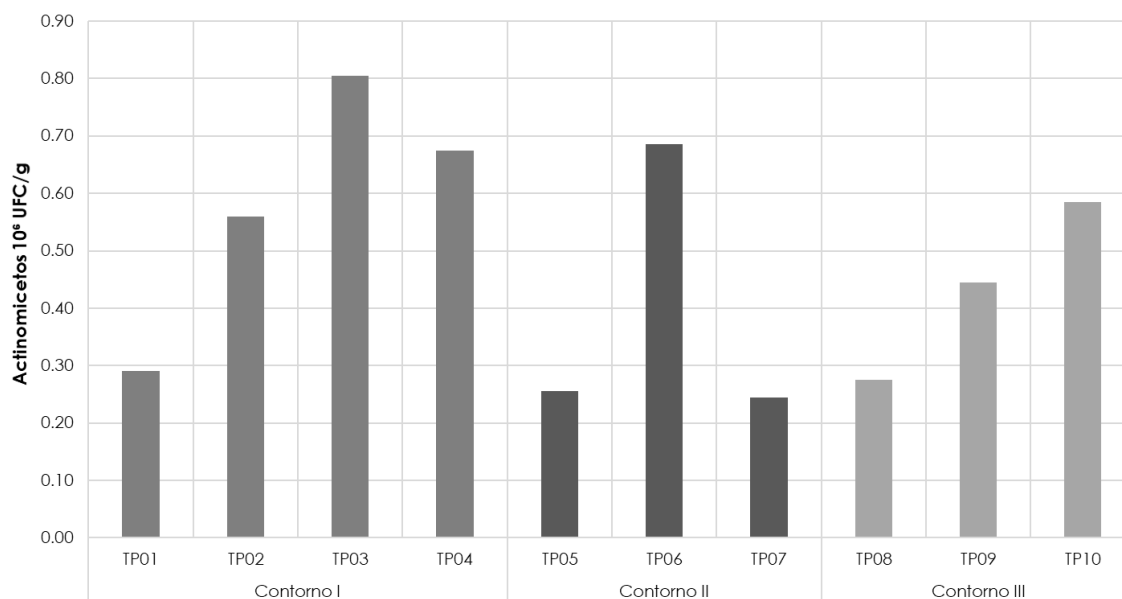


Figura 43. Unidades formadoras de colonias de Actinomicetos, por gramo de suelo de los perfiles estudiados.

A partir de la evaluación de las características biológicas y a manera de conclusión preliminar, se establece que el número de colonias de BMA, actinomicetos y hongos, pueden ser empleados como indicadores de desertificación, al aumentar de los perfiles más conservados a los erosionados, lo que se considera hace referencia a condiciones que propician este proceso.

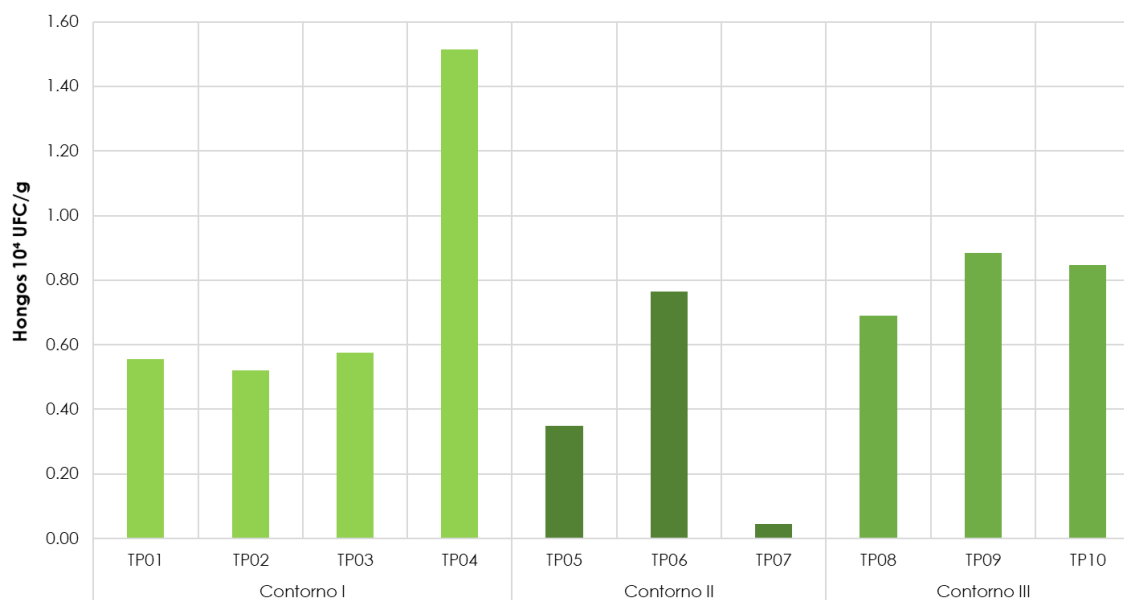


Figura 44. Unidades formadoras de colonias de Hongos, por gramo de suelo de los perfiles estudiados.

De esta forma, los resultados de la evaluación de las características morfológicas, físicas, químicas y biológicas de los suelos de estudio, y la descripción de las transformaciones que sufren estas variables con respecto al grado de erosión; permiten sugerir a la profundidad del horizonte superficial, la claridad (value) del color del suelo, el grado de desarrollo del sistema radicular; el contenido de gravas, piedras y rocas en la superficie, el pH, el contenido de materia orgánica, el porcentaje de carbonato de calcio, el contenido de magnesio y calcio; el conteo de BMA, actinomicetos y hongos; como indicadores para la alerta de procesos erosivos y de desertificación; ya que son estas variables las que exhiben cambios relacionados con la pérdida de suelo, con condiciones de bajas precipitaciones y con características del mismo que pueden contribuir al proceso de desertificación; cuyas tendencias son similares en los tres contornos evaluados.

8.4 Estimación de la erosión del suelo

Como forma de confirmación del grado de erosión determinado en campo y a manera de medición cuantitativa de éste; se estimó la erosión del suelo en toneladas por hectárea al año (t/ha/año) empleando la información obtenida de la caracterización de la zona de estudio, de la descripción de los perfiles y del entorno, y de los resultados de los análisis realizados; es decir, datos de precipitación media anual de la región, pendiente, cobertura vegetal, prácticas de conservación del suelo, textura y contenido de materia orgánica.

En el apartado 7.3.3.1, se observa que la ecuación para la estimación de la pérdida de suelo incluye la variable erosividad de la lluvia (R); de acuerdo con SAGARPA (2005), para todos los perfiles, R tiene el mismo valor, pues éstos se encuentran en la misma región; cuyo valor es de 2,227 Mj/ha mm/h. La pérdida de suelo (t/ha/año) de cada perfil se muestra en el Cuadro 17; en el que se observa que el aumento del grado de erosión, determinado en campo, coincide con el incremento de la pérdida de suelo (t/ ha/año).

Cuadro 17. Grado y estimación de la erosión de los perfiles estudiados.

Contorno	Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	Grado de Erosión	K	LS	C	P	E (t/ha/año)
I	TP01	AB	0-37	moderado	0.029	2.52	0.01	1.0	1.6
		B ₁	37-60	moderado	0.034	2.52	0.01	1.0	1.9
		B ₂	60-93	moderado	0.025	2.52	0.01	1.0	1.4
	TP02	BC	0-12	fuerte	0.025	1.87	0.10	1.0	10.4
		BCD	12-50+	fuerte	0.028	1.87	0.10	1.0	11.7
	TP03	BCD	0-8	muy fuerte	0.019	4.03	0.10	1.0	17.1
	TP04	BCD	0-5	muy fuerte	0.025	5.45	0.10	1.0	30.4
II	TP05	AB	0-17	moderado a fuerte	0.021	0.84	0.10	1.0	3.9
		BC	17-37	moderado a fuerte	0.025	0.84	0.10	1.0	4.7
	TP06	AB	0-9	muy fuerte	0.025	1.12	0.10	1.0	6.2
		BC	9-18	muy fuerte	0.036	1.12	0.10	1.0	8.9
	TP07	Capa I	0-4	muy severa	0.027	1.18	0.10	1.0	7.1
III	TP08	B	0-28	moderado	0.021	3.99	0.01	1.0	1.9
		B _T	28-50	moderado	0.018	3.99	0.01	1.0	1.6
		BC	50-73	moderado	0.016	3.99	0.01	1.0	1.4
	TP09	B	0-16	fuerte a muy fuerte	0.022	4.60	0.01	1.0	2.3
		C	16-37	fuerte a muy fuerte	0.024	4.60	0.01	1.0	2.5
	TP10	BC	0-9	muy fuerte	0.034	3.99	0.10	1.0	30.2
C		9-18	muy fuerte	0.034	3.99	0.10	1.0	30.2	

K: Erodabilidad del suelo, LS: Longitud y Grado de pendiente, C: Factor de vegetación, P: Factor de prácticas mecánicas, E: Erosión del suelo.

Asimismo, considerando que la tasa máxima permisible de pérdidas de suelo es de 10 t/ha/año (SAGARPA, 2005); se observa que en los perfiles de referencia la pérdida de suelo se encuentra por debajo de la máxima permisible, mientras que en los perfiles TP04 y TP10, dos de los que presentan mayor grado de erosión; las toneladas de suelo perdidas superan el límite. En el caso del perfil TP07 con grado de erosión muy severo, se considera que la pérdida de suelo no supera el límite ya que este perfil está conformado de roca, por lo que la cantidad de material que se puede perder es mínima.

Por lo tanto, se considera que es necesario aplicar medidas de conservación en esta región, tanto para mitigar la pérdida de suelo en zonas con erosión moderada como para recuperar regiones con mayor grado de erosión; pues en general los suelos muestran signos de degradación y no se observan prácticas que permitan mitigar este proceso.

8.5 Estimación del almacenamiento de carbono en el suelo

Los dos procesos antrópicos más importantes responsables de la liberación de CO₂ en la atmósfera son la quema de combustibles fósiles y el uso de la tierra. Asimismo, la erosión del suelo es el principal proceso de degradación de la tierra, que emite carbono del suelo (The World Bank, 2012). De esta manera, se buscó conocer cuánto carbono se encontraba retenido en los suelos evaluados ya que, como lo señalan los resultados de la fase de campo y de la estimación de la pérdida de suelo (t/ha/año), estos presentan diversos grados de erosión y en algunas casos superan la tasa máxima permisible de pérdida de suelo; además, los resultados de las variables analizadas muestran signos de erosión y desertificación; y de acuerdo a la información del tipo de vegetación en el área de estudio (Figura 29), del uso de suelo en dicha región (Figura 8), y a lo observado en campo; en la zona de estudio el cambio de uso de suelo ha sido considerable, y como se mencionó anteriormente, no se observan prácticas de conservación del mismo.

El almacenamiento de carbono orgánico (kg/m²) de cada perfil se muestra en el Cuadro 18; en el que se observa que, en los perfiles con mayor grado de erosión, el contenido de carbono es menor; y que en general, a mayor profundidad del suelo el mismo se incrementa. Considerando los horizontes superficiales, se observa que el contenido de carbono orgánico disminuye, en los tres Contornos, de los perfiles de referencia hacia los más erosionados. De esta manera se establece que, la transformación en el contenido de COS (kg/m²), reflejada especialmente en la disminución de éste en los horizontes superiores de los perfiles, podría emplearse también como indicador de la pérdida de suelo. Asimismo, se distingue que, el contenido de COS (kg/m²) en los suelos estudiados es muy bajo, variando éste de

0.0 a 9.3 kg/m². Estos resultados sugieren que en los suelos de la zona de estudio hay detrimento de la fertilidad, lo que se relaciona con la pérdida de suelo observada en campo y estimada en el apartado anterior; afectando la productividad agrícola y, por lo tanto, un medio de vida de los habitantes de dicha región, además de contribuir al cambio climático mediante la liberación de carbono a la atmósfera; por lo que se confirma la necesidad de implementar medidas de manejo y recuperación del suelo que permitan mantener la productividad de las tierras y contribuir a mitigar el cambio climático.

Cuadro 18. Estimación de Carbono Orgánico del Suelo (COS) de los perfiles estudiados.

Contorno	Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	CO (%)	DA (g/cm ³)	Ps (cm)	COS (kg/m ²)
I	TP01	AB	0-37	1.56	1.17	18.5	3.4
		B ₁	37-60	0.78	1.13	48.5	4.3
		B ₂	60-93	0.94	1.29	76.5	9.3
	TP02	BC	0-12	0.47	1.13	6.0	0.3
		BCD	12-50+	0.16	1.09	31.0	0.5
	TP03	BCD	0-8	1.72	1.28	4.0	0.9
TP04	BCD	0-5	0.62	1.04	2.5	0.2	
II	TP05	AB	0-17	1.40	1.17	8.5	1.4
		BC	17-37	0.31	1.25	27.0	1.1
	TP06	AB	0-9	0.47	1.14	4.5	0.2
		BC	9-18	0.31	1.06	13.5	0.4
	TP07	Capa 1	0-4	0.16	1.18	2.0	0.0
III	TP08	B	0-28	2.34	1.09	14.0	3.6
		B _r	28-50	0.78	1.20	39.0	3.6
		BC	50-73	0.47	1.20	61.5	3.4
	TP09	B	0-16	1.25	1.15	8.0	1.1
		C	16-37	0.47	1.16	26.5	1.4
	TP10	BC	0-9	0.94	1.14	4.5	0.5
C		9-18	0.31	1.10	13.5	0.5	

CO: Concentración de carbono orgánico en suelos, DA: Densidad aparente, Ps: Profundidad del suelo, COS: Carbono orgánico de suelos.

8.6 Análisis de resultados

Se realizó el análisis de correlación de Pearson de las variables morfológicas, físicas y químicas evaluadas, con respecto al grado de erosión del suelo. A manera de variable cuantitativa del grado de erosión, se emplearon los resultados obtenidos de la estimación de la pérdida de suelo, expresada en t/ha/año.

En los Cuadros 19 a 21 se muestran los resultados de este análisis y se marcan en “negritas” los valores de los parámetros seleccionados como posibles indicadores de erosión y desertificación.

Respecto a las características morfológicas, los resultados del análisis de correlación indican que las variables profundidad y porcentaje de piedras tienen moderada correlación con el grado de erosión. El signo negativo del coeficiente de correlación de la profundidad con la erosión indica una relación inversa entre estas variables, lo que concuerda con lo observado en los resultados anteriores. En el caso del porcentaje de piedras, el coeficiente de correlación indica una relación directa entre estas y la pérdida de suelo; misma observada anteriormente. Asimismo, se observa correlación baja tanto entre el value en húmedo y el grado de erosión, como entre este último y el porcentaje de rocas en el perfil; lo que concuerda con las variaciones observadas en la fase de laboratorio (Cuadro 19).

Cuadro 19. Coeficiente de correlación y valor de p de las características morfológicas.

Coeficiente de correlación						
	Profundidad	Tipo de estructura	Tamaño de estructura	Value en seco	Chroma en seco	Value en húmedo
Erosión	-0.555	-0.361	-0.245	0.343	0.208	0.439
Valor de p						
	Profundidad	Tipo de estructura	Tamaño de estructura	Value en seco	Chroma en seco	Value en húmedo
Erosión	0.014	0.129	0.313	0.151	0.392	0.060
Coeficiente de correlación						
	Chroma en húmedo	Desarrollo radicular	Tamaño de raíz	Gravas	Piedras	Rocas
Erosión	0.385	-0.291	-0.156	0.343	0.533	0.389
Valor de p						
	Chroma en húmedo	Desarrollo radicular	Tamaño de raíz	Gravas	Piedras	Rocas
Erosión	0.104	0.228	0.524	0.150	0.019	0.099

En cuanto a las características físicas, la plasticidad muestra una correlación inversa con el grado de erosión, lo que difiere de lo observado a partir de los resultados de laboratorio, en los que no se aprecia una tendencia definida de este parámetro a disminuir conforme la pérdida de suelo es mayor. En el caso del limo, se observa que hay una relación directamente proporcional con la pérdida de suelo, mientras que los resultados de laboratorio muestran tendencias diferentes en los tres contornos estudiados. Asimismo, esta tendencia difiere de lo mencionado por Do Prado y Da Veiga (1993), quienes indican que en el proceso de erosión las partículas más finas del suelo son arrastradas, quedando las más pesadas (Cuadro 20).

Cuadro 20. Coeficiente de correlación y valor de p de las características físicas.

Coeficiente de correlación					
	arena	limo	arcilla	Densidad aparente	Plasticidad
Erosión	-0.204	0.435	-0.044	-0.382	-0.450
Valor de p					
	arena	limo	arcilla	Densidad aparente	Plasticidad
Erosión	0.401	0.063	0.858	0.107	0.053

En las características químicas, el pH muestra una correlación baja, el calcio correlación moderada y los carbonatos una correlación alta, en todos los casos directamente proporcional, con respecto al grado de erosión. En estos casos, el valor de p indica que es una correlación significativa; lo que confirma lo concluido de los análisis de laboratorio (Cuadro 21).

Cuadro 21. Coeficiente de correlación y valor de p de las características químicas.

Coeficiente de correlación									
	ph	MO	Nitrógeno	Carbonatos	CIC	Ca	Mg	Na	K
Erosión	0.443	-0.182	0.055	0.774	0.070	0.511	-0.376	-0.286	-0.129
Valor de p									
	ph	MO	Nitrógeno	Carbonatos	CIC	Ca	Mg	Na	K
Erosión	0.058	0.457	0.822	0.000	0.775	0.025	0.113	0.236	0.599

MO: Materia orgánica, CIC: Capacidad de intercambio catiónico, Ca: Calcio, Mg: Magnesio, Na: Sodio, K: Potasio.

En cuanto a las características biológicas, se realizó el análisis de varianza de un factor para comparar las medias de cada parámetro evaluado en cada perfil. Se realizó este análisis considerando que cada perfil representa una situación diferente en cuanto a grado de erosión. La hipótesis nula establecida para cada parámetro biológico evaluado fue que la media de todos los perfiles era igual. De acuerdo con los resultados del análisis de varianza se rechaza la hipótesis nula y se establece que existen diferencias significativas entre los diferentes perfiles de suelo, en todas las características biológicas consideradas; pues en todos los casos el valor de p empírico es menor que $\alpha=0.05$ (Cuadro 22).

Cuadro 22. Valor de p del análisis de varianza de las características biológicas.

Parámetro	Pr(>F)
DHA	1.76E-15 ***
GDHA	9.38E-12 ***
BMA	1.53E-15 ***
Gram negativas	<2E-16 ***
Actinomicetos	9.33E-07 ***
Hongos	1.67E-10 ***

**** 0.001, *** 0.01, ** 0.05, * 0.1, " " 1

Pr(<F) valor de p

De esta manera, se observa que las variables que muestran correlación con el grado de erosión de los perfiles y que coinciden con lo observado a partir de los resultados de laboratorio, son la profundidad, el contenido de piedras y rocas, el value del color en húmedo, el pH, el contenido de carbonatos y de calcio. Respecto a las características biológicas, en todos los casos se observa una diferencia significativa entre los perfiles. Los parámetros que coinciden con la variación observada en los resultados de laboratorio son el conteo de BMA, Gram negativas, Actinomicetos y Hongos. Por lo tanto, se considera que las variables antes mencionadas se pueden proponer como indicadores edáficos.

IX. CONCLUSIONES

Las variables edáficas evaluadas que muestran una variación más clara con respecto al grado de erosión y tendencia similar en los tres contornos evaluados son nueve. Estas son la profundidad del horizonte superficial, la claridad (value) del color del suelo, el grado de desarrollo del sistema radicular; el contenido de gravas, piedras y rocas en la superficie, el pH, el contenido de materia orgánica, el porcentaje de carbonato de calcio, el contenido de magnesio y calcio, y el conteo de BMA, actinomicetos y hongos.

Las características edáficas morfológicas, físicas y químicas que muestran mayor variación con respecto al grado de erosión en los perfiles estudiados y que de acuerdo con el análisis estadístico, exhiben una correlación importante entre éstas, son seis; la profundidad, el porcentaje de piedras y rocas, la claridad (value) del suelo en húmedo, el pH, el contenido de carbonatos y calcio.

Respecto a las características biológicas, en todos los casos se observa una diferencia significativa entre los perfiles. Los parámetros que coinciden con la variación observada en los resultados de laboratorio son el conteo de BMA, de Actinomicetos y Hongos.

Los cambios en la profundidad del horizonte superficial, la claridad (value) en húmedo del color del suelo; el contenido de piedras y rocas en la superficie, provocados por la erosión, pueden ser empleados como indicadores para la alerta de este proceso, en la zona de estudio. Estos se consideran parámetros fácilmente observables, medibles en campo y especialmente útiles para quienes están en contacto directo y constante con el suelo, permitiéndoles identificar, de manera sencilla, cambios en estas características.

Las transformaciones en el contenido de carbonato de calcio equivalente; también se sugieren como indicadores para la alerta del proceso de erosión en esta región.

Las transformaciones en el pH, en el contenido de carbonato de calcio equivalente, en el contenido de calcio; y en el número de colonias de BMA, actinomicetos y hongos, se sugieren como indicadores de desertificación ya que, en regiones áridas y semiáridas, estos hacen referencia a condiciones de bajas precipitaciones, mismas que pueden contribuir a dicho proceso.

Se sugiere ampliar el estudio de las nueve variables edáficas, mencionadas anteriormente; realizándolo en los horizontes superiores del suelo y empleando mayor número de muestras.

Se requiere la implementación de prácticas de manejo que permitan la recuperación de los suelos afectados por el proceso de erosión y las que sean

acordes con las características climáticas de la zona; con el fin de mantener la productividad de las tierras, contribuir al desarrollo sustentable de la región, a mitigar el cambio climático y evitar la migración de los habitantes.

X. ANEXOS

Anexo 1. Datos climatológicos de las cuatro estaciones próximas a la zona de estudio.

Estación: 00021164 San Juan Tetla. Periodo: 1951-2010 Latitud 19°12'55" N Longitud 98°30'08" O												
Elemento	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Temperatura												
Máxima Mensual	13.9	18.0	19.9	20.9	18.8	21.4	17.0	17.0	16.3	15.8	14.6	13.3
Precipitación												
máxima mensual	85.7	23.8	48.2	89.2	167.6	408.8	716.9	717.9	296.5	259.0	53.0	64.9
Evaporación total normal	63.1	71.3	99.6	90.7	85.6	75.5	83.1	79.7	65.8	63.1	68.1	62.2
Estación: 00021214 San Juan Tetla Siete Norte. Periodo:1951-2010 Latitud 19°10'26" N Longitud 98°34'50" O												
Elemento	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Temperatura												
Máxima Mensual	17.0	18.7	24.3	22.2	32.0	21.4	31.7	31.2	31.5	31.5	31.7	31.3
Precipitación												
máxima mensual	83.2	26.0	34.8	170.3	184.5	346.4	297.4	308.7	233.4	211.6	35.7	19.8
Evaporación total normal	37.7	48.7	74.0	72.6	65.9	53.7	56.1	61.3	49.8	51.1	44.6	38.7
Estación: 00021016 Balcon Diablo A. Texaluca. Periodo 1951-2010 Latitud 18°53'51" N Longitud 98°07'56" O												
Elemento	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Temperatura												
Máxima Mensual	25.1	26.2	28.4	30.0	30.3	29.3	26.1	26.7	28.2	26.9	27.9	25.1
Precipitación												
máxima mensual	103.9	39.9	49.9	96.7	189.4	289.3	330.3	373.5	409.2	228.8	81.4	73.3
Evaporación total normal	136.1	155.5	217.3	227.4	208.8	161.1	157.3	157.3	128.2	138.8	132.7	127.0
Estación:00021071 San Baltazar Tetela, Dge. Periodo 1951-2010 Latitud 18°54'16" N Longitud 98°10'14" O												
Elemento	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Temperatura												
Máxima Mensual	29.2	25.8	28.6	29.8	29.7	29.3	27.4	27.8	27.3	26.3	26.5	25.4
Precipitación												
máxima mensual	95.6	34.9	41.0	84.0	142.3	285.5	405.0	349.5	380.3	148.8	69.0	26.0
Evaporación total normal	127.7	148.5	206.8	227.2	224.3	176.4	165.9	162.0	130.9	134.1	123.3	117.1

Anexo 2. Resultados de las características morfológicas

Contorno	Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	Estructura		Color		Sistema radicular		Contenido (%)			
				Tipo	Tamaño	Seco	Húmedo	Desarrollo	Raíces	Gravas	Piedras	Rocas	
I	TP01	AB	0-37	subangular	muy pequeña	10YR 4/3 pardo	10YR 2/2 pardo muy oscuro	mediano	finas	5	0	0	
		B ₁	37-60	subangular	mediana	10YR 4/2 pardo grisáceo oscuro	10YR 3/1 gris muy oscuro	poco	finas y medias	>5	0	0	
		B ₂	60-93	subangular	mediana grande	10YR 4/2 pardo grisáceo oscuro	10YR 3/1 gris muy oscuro	poco	finas y medias	5-10	0	0	
	TP02	BC	0-12	-	-	10YR 7/2 gris claro	10YR 5/3 pardo	poco	medias	0	0	0	
		BCD	12-50+	subangular	pequeña mediana grande	10YR 6/3 pardo pálido	10YR 5/3 pardo	poco	medias	0	0	0	
	TP03	BCD	0-8	granular	pequeña mediana	10YR 4/2 pardo grisáceo oscuro	10YR 2/2 pardo muy oscuro	poco	finas	30	40		
	TP04	BCD	0-5	subangular	pequeña mediana	10YR 6/2 gris pardusco claro	10YR 5/2 pardo grisáceo	poco	finas	30	30	15	
	II	TP05	AB	0-17	bloques y subangular	mediana pequeña	10YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro	10YR 3/1 gris muy oscuro	muy desarrollado	finas y grandes	0	0	0
			BC	17-37	bloques y subangular	mediana grande	10YR 5/2 pardo grisáceo	10YR 3/1 gris muy oscuro	poco	finas y medias	5	5-10	0
		TP06	AB	0-9	subangular	mediana pequeña	10YR 5/2 pardo grisáceo	10YR 4/2 pardo grisáceo oscuro	mediano	finas	20-30	10	5
BC			9-18	subangular	mediana	10YR 7/2 gris claro	10YR 4/2 pardo grisáceo oscuro	poco	finas	5-15	0	5-15	
TP07	Capa 1	0-4	-	-	10YR 6/4 pardo amarillento claro	10YR 3/4 pardo amarillento oscuro	poco	finas	0	0	0		
III	TP08	B	0-28	subangular	mediana grande	10YR 4/1 gris oscuro	10YR 3/1 gris muy oscuro	mediano	finas y medias	15-20		5	
		B _r	28-50	subangular	mediana grande	10YR 4/1 gris oscuro	10YR 3/1 gris muy oscuro	poco	finas	<5		<5	
		BC	50-73	subangular	mediana grande	10YR 5/2 pardo grisáceo	10YR 4/2 pardo grisáceo oscuro	poco	medias	<5	0	0	
	TP09	B	0-16	bloques y subangular	mediana	10YR 5/2 pardo grisáceo	10YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro	mediano	finas	20-30	10	5	
		C	16-37	rocosa	-	10YR 7/2 gris claro	10YR 4/2 pardo grisáceo oscuro	poco	finas	5-15	0	5-15	
	TP10	BC	0-9	subangular	pequeña mediana	10YR 5/3 pardo	10YR 4/2 pardo grisáceo oscuro	poco	finas	20-30	10	<5	
		C	9-18	-	-	10YR 6/2 gris pardusco claro	10YR 4/3 pardo	poco	finas	0	0	0	

Anexo 3. Resultados de las características físicas

Contorno	Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	% de las Fracciones			Clase Textural	Plasticidad	DA (g/cm ³)
				Arena	Limo	Arcilla			
I	TP01	AB	0-37	44	36	20	franco	ligeramente plástico	1.17
		B ₁	37-60	50	30	20	franco	ligeramente plástico	1.13
		B ₂	60-93	44	26	30	franco arcilloso	muy plástico	1.29
	TP02	BC	0-12	34	36	30	franco arcilloso	no plástico	1.13
		BCD	12-50+	26	34	40	franco arcilloso	no plástico	1.09
TP03	BCD	0-8	68	16	16	franco arenoso	plástico	1.28	
TP04	BCD	0-5	36	28	36	franco arcilloso	ligeramente plástico	1.04	
II	TP05	AB	0-17	70	12	18	franco arcillo arenoso	ligeramente plástico	1.17
		BC	17-37	54	22	24	franco arcillo arenoso	ligeramente plástico	1.25
	TP06	AB	0-9	54	26	20	franco arcillo arenoso	ligeramente plástico	1.14
		BC	9-18	50	32	18	franco	ligeramente plástico	1.06
	TP07	Capa I	0-4	62	30	8	franco arenoso	no plástico	1.18
III	TP08	B	0-28	46	26	28	franco arcillo arenoso	plástico	1.09
		B _r	28-50	28	22	50	arcilloso	muy plástico	1.20
	BC	50-73	24	24	52	arcilloso	plástico	1.20	
	TP09	B	0-16	34	20	46	arcilloso	muy plástico	1.15
		C	16-37	60	34	6	franco arenoso	no plástico	1.16
TP10	BC	0-9	32	42	26	franco	no plástico	1.14	
	C	9-18	36	40	24	franco	no plástico	1.10	

DA: Densidad aparente.

Anexo 4. Resultados de las características químicas

Contorno	Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	M.O. (%)	N Total (%)	CaCO ₃ (%)	pH	CIC	BASES INTERCAMBIABLES			
									Ca	Mg	Na	K
									Cmol(+)/kg ⁻¹			
I	TP01	AB	0-37	2.7	0.11	1.4	6.3	11.4	21	7.8	0.15	0.07
		B ₁	37-60	1.3	0.07	1.4	7.1	16.8	25.3	14.66	0.66	0.64
		B ₂	60-93	1.6	0.07	1.6	7	18.8	21.3	10.47	0.19	0.05
	TP02	BC	0-12	0.8	0.04	2	7.4	14.2	24.6	14.93	0.33	0.92
		BCD	12-50+	0.3	0.07	2	7.6	37.8	17.5	6.96	0.15	0.23
TP03	BCD	0-8	3	0.14	1.4	6.7	26.8	18.4	7.03	0.16	0.15	
TP04	BCD	0-5	1.1	0.11	14	7.5	22.6	34.3	12.23	0.21	0.08	
II	TP05	AB	0-17	2.4	0.18	0	5.2	14	10.2	5.33	0.14	0.11
		BC	17-37	0.5	0.11	0.2	6.5	16.6	17.4	10.71	0.41	0.27
	TP06	AB	0-9	0.8	0.11	1.4	7.4	21	26.7	5.88	0.21	0.29
		BC	9-18	0.5	0.14	4.2	7.6	37.2	32	10.35	0.25	0.14
	TP07	Capa I	0-4	0.3	0.07	1.2	7.3	21.8	21.6	12.33	0.13	0.53
III	TP08	B	0-28	4	0.11	1	7.2	23.6	27.4	5.5	0.13	0.2
		B _r	28-50	1.3	0.11	0.4	6.9	26.8	26.8	10.2	0.38	0.03
	BC	50-73	0.8	0.04	0.2	7	38.6	25.1	10.45	0.61	0.05	
	TP09	B	0-16	2.2	0.14	0.4	6.6	22.2	22.5	15.45	0.2	0.38
		C	16-37	0.8	0.14	1.4	7.1	24.6	25.9	20.03	0.35	0.03
TP10	BC	0-9	1.6	0.07	3	7.5	22.8	31.6	3.77	0.17	0.14	
	C	9-18	0.5	0.14	8.2	7.6	21.6	32.6	4.02	0.25	0.07	

M.O: Materia orgánica, N Total: Nitrógeno total, CaCO₃: Carbonato de calcio, CIC: Capacidad de intercambio catiónico, Ca: Calcio, Mg: Magnesio, Na: Sodio, K: Potasio.

Anexo 5. Resultados de las características biológicas

Contorno	Perfil	DHA (μg TTF/g de suelo en 24 h)	GDHA	C/N	BMA (10^6 UFC/g)	Gram negativas (10^6 UFC/g)	Actinomicetos (10^6 UFC/g)	Hongos (10^4 UFC/g)
I	TP01	0.79	1.06	14.86	1.46	1.48	0.29	0.56
	TP02	0.62	0.32	13.37	1.43	0.16	0.56	0.52
	TP03	2.18	4.62	12.26	1.67	0.21	0.81	0.58
	TP04	0.13	0.84	5.94	2.55	0.15	0.68	1.52
II	TP05	0.24	0.21	8.02	0.36	0.14	0.26	0.35
	TP06	1.53	2.43	4.46	1.01	0.29	0.69	0.77
	TP07	0.87	1.66	2.23	0.18	0.01	0.25	0.05
III	TP08	1.25	2.65	22.29	0.65	0.41	0.28	0.69
	TP09	0.08	0.30	8.91	0.92	0.32	0.45	0.89
	TP10	0.84	1.09	13.37	0.91	0.02	0.59	0.85

DHA: Deshidrogenasa, GDHA: Glucosa deshidrogenasa, TTF: Trifenil-formazan, C/N: Relación Carbono/Nitrógeno, BMA: Bacterias mesófilas aerobias, UFC: Unidades formadoras de colonias.

Anexo 6. Resultados del análisis de correlación

Correlación de Pearson		Valores de p por pares	
a)	Erosión	b)	Erosión
Ca	0.5110	Ca	0.0254
Chroma en húmedo	0.3847	Chroma en húmedo	0.1039
Chroma en seco	0.2083	Chroma en seco	0.3921
CIC	0.0701	CIC	0.7754
DA	-0.3818	DA	0.1068
Desarrollo radicular	-0.2906	Desarrollo radicular	0.2275
Erosión	1.0000	Erosión	
K	-0.1289	K	0.5989
Mg	-0.3761	Mg	0.1125
Na	-0.2857	Na	0.2357
pH	0.4428	pH	0.0576
Plasticidad	-0.4501	Plasticidad	0.0532
Profundidad	-0.5551	Profundidad	0.0136
Tamaño de estructura	-0.2445	Tamaño de estructura	0.3131
Tamaño de raíz	-0.1559	Tamaño de raíz	0.5238
Tipo de estructura	-0.3605	Tipo de estructura	0.1294
Value en húmedo	0.4390	Value en húmedo	0.0601
Value en seco	0.3425	Value en seco	0.1511
Arcilla	-0.0439	Arcilla	0.8584
Arena	-0.2044	Arena	0.4011
Carbonatos	0.7742	Carbonatos	0.0001
Gravas	0.3432	Gravas	0.1503
Limo	0.4347	Limo	0.0629
MO	-0.1815	MO	0.4572
Nitrógeno	0.0552	Nitrógeno	0.8224
Piedras	0.5333	Piedras	0.0187
Rocas	0.3888	Rocas	0.0999

a) Valores de correlación entre los parámetros evaluados y la pérdida de suelo (ton/ha/año). b) Valores de p empírico de las correlaciones realizadas.

Ca: Calcio, CIC: Capacidad de intercambio catiónico, DA: Densidad aparente, K: Potasio, Mg: Magnesio, Na: Sodio, MO: Materia orgánica.

Anexo 7. Resultados del análisis de varianza

DHA					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Perfil	9	11.811	1.3124	121.8	1.76E-15 ***
Residuals	20	0.215	0.0108		
GDHA					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Perfil	9	51.62	5.735	49.94	9.38E-12 ***
Residuals	20	2.30	0.115		
BMA					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Perfil	9	13.026	1.4474	123.6	1.53E-15 ***
Residuals	20	0.234	0.0117		
Gram negativas					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Perfil	9	4.879	0.5422	197.1	<2E-16 ***
Residuals	20	0.055	0.0028		
Actinomicetos					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Perfil	9	1.1648	0.12942	13.74	9.33E-07 ***
Residuals	20	0.1884	0.00942		
Hongos					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Perfil	9	4.015	0.4461	36.7	1.67E-10 ***
Residuals	20	0.243	0.0122		

**** 0.001, *** 0.01, ** 0.05, * 0.1, " " 1

Df: Grados de libertad, Residuals: Residuos, Sum Sq: Suma de cuadrados, Mean Sq: Media de cuadrados, F value: Cociente F, Pr(>F): Valor de p.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Abraham, E., Montaña, E. y Torres, L. (2006). Desertificación e Indicadores: Posibilidades de medición integrada de fenómenos complejos. *Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*. 10 (214). <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-214.htm>
- Andrade, J.H. e Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?. *Agroforestería en las Américas*. 10 (39-40).
- Barajas, M. (2008). Ensayos de metabolismo microbiano en suelo: actividad deshidrogenasa y tasa de mineralización del nitrógeno. (1ª. Ed.). En: *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo. La Experiencia en México*. Ramírez, P. y Mendoza, A. (comp.). México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología.
- Becerril-Piña, R., Díaz-Delgado, C., Mastachi-Loza, C.A., González-Sosa, E. y Bâ, K. (2014). Índice Tendencial de Riesgo a la Desertificación: Propuesta para la Evaluación y Monitoreo en el Semiárido Mexicano. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. Puerto Vallarta, Jalisco, México, Octubre 2014.
- Becerril-Piña, R., Mastachi-Loza, C.A., González-Sosa, E., Díaz-Delgado, C. y Bâ, K.M. (2015). Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. *Journal of Arid Environments*. 120. 4-13.
- Brandt, J. y Geeson, N. Desertificación e Indicadores. *Land Care in Desertification Affected Areas From Science Towards Application*. LUCINDA.
- Brunel, N. y Seguel, O. (2011). Efectos de la erosión en las propiedades del suelo. *Agro Sur*. 39(1), 1-12.
- Cervantes, M.C. (2002). Plantas de importancia económica en las zonas áridas y semiáridas de México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chartier, M.P. y Rostagno, C.M. (2006). Soil Erosion Thresholds and Alternative States in Northeastern Patagonian Rangelands. *Rangeland Ecology & Management*. 59(6), 616-624.
- Chartier, M.P., Rostagno, C.M. y Videla, L.S. (2013). Selective erosion of clay, organic carbon and total nitrogen in grazed semiarid rangelands of northeastern Patagonia, Argentina. *Journal of Arid Environments*. 88, 43-49.
- Chartier, M.P., Rostagno, C.M., Roig, F.A. (2009). Soil erosion rates in rangelands of northeastern Patagonia: A dendrogeomorphological analysis using exposed shrub roots. *Geomorphology*. 106, 344-351.

- Chela, E. (2008). Evaluación de la pérdida del suelo por erosión hídrica en tres sistemas de producción en la microcuenca de la Quebrada Chilcapamba, Cantón Chillanes, Provincia Bolívar. Tesis para la obtención del título de ingeniero agrónomo. Universidad Estatal de Bolívar, Ecuador. https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/68998/4760_Tesis_Final_E_Chela.pdf?sequence=1
- CINU. Centro de Información de las Naciones Unidas. México, Cuba y República Dominicana. (2015). Desertificación. Recuperado 7 de julio, 2015 de, <http://www.cinu.mx/temas/medio-ambiente/desertificacion/>
- CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2016). Biodiversidad Mexicana. Consultado en <http://www.biodiversidad.gob.mx/>
- CONAFOR-UACH. (2013). Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Informe Final. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo. Zapopan, Jalisco.
- CONAPO. Consejo Nacional de Población. (2012). Índice de marginación por localidad 2010. Base de datos por entidad. Consultado el 3 de abril de 2016 en http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Indice_de_Marginacion_por_Localidad_2010
- CONEVAL. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2010). Índice de rezago social 2010 a nivel municipal y por localidad. Consultado el 3 de abril de 2016 en <http://www.coneval.gob.mx/Medicion/IRS/Paginas/%C3%8Dndice-de-Rezago-social-2010.aspx>
- D'Odorico, P., Bhattachan, A., Davis, K.F., Ravi, S. y Runyan, C.W. (2013). Global desertification: Drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources*. 51, 326-344.
- Díaz-Padilla, G., Sánchez-Cohen, I., Guajardo-Panes, R.A., Del Ángel-Pérez, A.L., Ruíz-Corral, A., Medina-García, G. e Ibarra-Castillo, D. (2011). Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 17(spe), 267-275.
- Do Prado, L. y Da Veiga, M. (1993). Erosión y pérdida de fertilidad del suelo. En: *Erosión de suelo en America Latina*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- European Commission. (1999). Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification. The Medalus Project – Mediterranean desertification and land use. Kosmas, C., Kirkby, M., Geeson, N. (eds.). Luxembourg.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2009a). Guía para la descripción de suelos. (4ª ed., R. Vargas Rojas trad.). Roma.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2007a). Las tierras áridas del mundo. En: Secuestro de carbono en tierras áridas. Informes sobre recursos mundiales de suelos 102. Roma.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015). Portal de Suelos de la FAO. Degradación del Suelo. Consultado el 2 de julio de 2015 en <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/es/>
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2009b). Monitoreo y Evaluación de los Recursos Forestales Nacionales-Manual para la recolección integrada de datos de campo. Versión 2.2. documento de Trabajo de Monitoreo y Evaluación de los recursos Forestales Nacionales, NFMA 37/S. Roma.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2007b). Manual de Evaluación Local de la Degradación de Tierras Áridas (LADA-L). Versión final. Septiembre de 2007.
- Fernández, L.C., Rojas, N.G., Roldán, T.G., Ramírez, M.E., Zegarra, H.G., Uribe, R., Reyes, R.J., Flores, D., y Arce, J.M. (2006). Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. D.F., México: Instituto Mexicano del Petróleo, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- Ganasri, B.P. y Ramesh, H. (2015). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin. Geoscience Frontiers. 1-9.
- García, T. (2016). Propuesta de restauración del recurso suelo en la comunidad de Tepenene. Una alternativa para transitar hacia el desarrollo sustentable. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias Ambientales. Posgrado en Ciencias Ambientales. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- García-Fayos, P. (2004). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. En: Valladares, F. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Páginas 309-334. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S.A., Madrid.

- González, F. (2012). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. 1ª ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT: México.
- Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M.A., Vázquez-Alarcón, A. y Ruíz-Puga, P. (2013). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. XIX(1). 45-66.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2010). Metodología de la Investigación. 5ª. Ed. McGraw-Hill.
- Hori, Y., Stuhlberger, C. y Simonett, O. (2011). Desertificación: Una síntesis visual. Gutiérrez Teira, B. (trad.). Francia: UNCCD United Nations Convention to Combat Desertification.
- INAFED. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (2010). Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Estado de Puebla. Recuperado 2 de julio, 2015 de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/index.html>
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2001). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional escala 1:1 000 000 serie I (Sistema topofomas) Edición 2001.
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Puebla, Puebla. México: INEGI.
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Censo de población y vivienda 2010. Resultados sobre localidades con menos de 5 mil habitantes. Consultado en: http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/m5mh.aspx?c=28004
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014a). Anuario estadístico y geográfico de Puebla 2013. México: INEGI.
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014b). Conjunto de Datos de Erosión del Suelo, Escala 1:250 000 Serie I Continuo Nacional, Disponible: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825004223>
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III. E14B53 (San Francisco Totimehuacán). Edición 2015.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2016a). Mapa Digital de México V6.1. Consultado el 2 de abril de 2016 en

<http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjE4Ljc1NzYzLGxvbjotOTguMTUzMzcsejo3LGw6YzExMXNlcnZpY2lvc3x0YzExMXNlcnZpY2lvcw>

- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2016b). Marco Geoestadístico Nacional. Localidades Geoestadísticas-archivo histórico-consulta. Consultado el 26 de mayo de 2016 en http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/consulta_localidades.aspx
- Jaramillo, D.F. (2002). Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
- Kairis, Or., Kosmas, C., Karavitis, Ch., Ritsema, C., Salvati, L. *et al.* (2014). Evaluation and Selection of Indicators for Land Degradation and Desertification Monitoring: Types of Degradation, Causes, and Implications for Management. *Environ. Manage.* 54(5): 971-982.
- Klass, J.R., Peters, D.P.C., Trojan, J.M. y Thomas, S.H. (2012). Nematodes as an indicator of plant-soil interactions associated with desertification. *Applied Soil Ecology.* 58, 66-77.
- Kosmas, C., Kairis, Or., Karavitis, Ch., Ritsema, C., Salvati, L. *et al.* (2014). Evaluation and Selection of Indicators for Land Degradation and Desertification Monitoring: Methodological Approach. *Environ. Manage.* 54(5): 951-970.
- Krasilnikov, P., Gutiérrez-Castorena, M. C., Ahrens, R. J., Cruz-Gaistardo, C. O., Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E. (2013). The soils of Mexico. World Soils Book Series. Springer. p.130.
- López, R. (2002). Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación. Universidad de los Andes. 2ª. Ed. Mérida, Venezuela: Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial CIDIAT.
- Maestre, F.T. y Escudero, A. (2009). Is the patch size distribution of vegetation a suitable indicator of desertification processes?. *Ecology.* 90(7), 1729-1735.
- Maestre, F.T. y Puche, M.D. (2009). Indices based on surface indicators predict soil functioning in Mediterranean semi-arid steppes. *Applied Soil Ecology.* 41, 342-350.
- Margulis, L., Bassler, B., Sandín, M., Restrepo, J. *et al.* (2014). El metabolismo digestivo de los microorganismos del suelo. En: Microbiótica. Nutrición Simbiótica y Microorganismos regeneradores. Una revolución para salvar la Tierra y el ser humano. Ediciones i. Madrid, España.

- Montejo, M., Torres, C.P., Martínez, A., Tenorio, J.A., Cruz, M.R., Ramos, F.R., Cuevas, M.C. (2012). Técnicas para el análisis de actividad enzimática en suelos. En: Métodos ecotoxicológicos para la evaluación de suelos contaminados con hidrocarburos. Cuevas, M.C., Espinosa, G., Ilizaliturri, C.A., Mendoza, A. (eds.). 1ª. Ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Universidad Veracruzana. Fondos Mixtos CONACYT.
- Morales, C. (2005). Pobreza, desertificación y degradación de tierras. En: Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. Morales, C. y Parada, S. (eds.). Santiago de Chile: CEPAL Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Munsell Color. (1994). Munsell Soil Color Charts. Revised edition. Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation. New Windsor, NY.
- Osman, K.T. (2014). Soil Degradation, Conservation and Remediation. Department of Soil Science. University of Chittagong. Chittagong, Bangladesh: Springer Netherlands.
- Rostagno, C.M., Degorgue, G. (2011). Desert pavements as indicators of soil erosion on aridic soils in north-east Patagonia (Argentina). *Geomorphology*. 134, 224-231.
- Ruíz, J., Calderón, E., Tamariz, J.V., Tremols, J., Cruz, A., Valera, M.A., Handal, A. (1999). Manual para la descripción de perfiles de suelos y evaluación del entorno. Textos UAP. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. México.
- Saavedra, C. (2014). Guía simplificada de evaluación del suelo y manejo sostenible de la tierra para una agricultura en laderas. Proyecto Gestión de Recursos Naturales y Cambio Climático de la Cooperación Suiza en Bolivia. HELVETAS Swiss Intercooperation.
- SAGARPA. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2012). Subíndice de Uso Sustentable del Suelo Metodología de Cálculo. Línea de Base del Programa de Sustentabilidad de los Recursos Naturales. Food and Agriculture Organization of the United Nations. http://smye.info/rn/ind_fin/suelos/Documento_metodologico_suelos.pdf
- SAGARPA. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2005). Estimación de la Erosión del Suelo. Instituto Nacional para el Desarrollo de Capacidades del Sector Rural. Colegio de Postgraduados.

- Salvati, L., Zitti, M. y Ceccarelli, T. (2008). Integrating economic and environmental indicators in the assessment of desertification risk: a case study. *Applied Ecology and Environmental Research*. 6(1), 129-138.
- Sánchez, P., Ortiz, C.A. y Cajuste, L. (2014). Cartografía Nacional del índice de aridez potencial para suelos de México. En: *Memorias en Extenso XXXVIII Congreso de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, AC. Suplemento Especial*. 1(1). 33-38.
- SEDESOL. Secretaría de Desarrollo Social. (2013). Catálogo de Localidades. Sistema de Apoyo para la Planeación del PDZP. Municipio de Puebla. Unidad de Microrregiones. Dirección General Adjunta de Planeación Microrregional. Secretaría de Desarrollo Social. Consultado el 21 de mayo de 2016 en <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=21&mun=114>
- SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Edición 2010. México.
- SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012. México.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre de 2002, México.
- SGM Servicio Geológico Mexicano. (2014). Carta Geológico-Minera San Francisco Totimehuacán E14-B53 Puebla. Edición de cartas geológico-mineras y geoquímicas escala 1:50,000. Consultado el 3 de marzo de 2017 en http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed50.jsp
- SMN. Servicio Meteorológico Nacional. (2017). Información Climatológica. Normales Climatológicas por Estado. Comisión Nacional del Agua. Consultado en <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>
- Sommer, S., Zucca, C., Grainger, A., Cherlet, M., Zougmore, R., Sokona, Y., Hill, J., Della Peruta, R., Roehrig, J. y Wang, G. (2011). Application of indicator systems for monitoring and assessment of desertification from national to global scales. *Land Degradation & Development*. 22, 184-197.

- SSSA. Soil Science Society of America. (2015). Glossary of Soil Science Terms. Recuperado 7 de Julio, 2015 de <https://www.soils.org/publications/soils-glossary>
- Steiner, K. y Sörensen, L. (2011). Talking about. Annotated Glossary on Combating Desertification and Sustainable Land Management. Bonn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- The World Bank. (2012). Carbon Sequestration in Agricultural Soils. Economic and Sector Work. International Bank for Reconstruction and Development. Agriculture and Rural Development (ARD).
- UNCCD United Nations Convention to Combat Desertification. (2014a). Neutralidad en la Degradación de la Tierra: La resiliencia a escala local, nacional y regional. Bonn, Alemania: UNCCD.
- UNCCD United Nations Convention to Combat Desertification. (2014b). La Desertificación, esa invisible línea de frente. Segunda edición. Bonn, Alemania: UNCCD.
- UNEMG United Nations Environment Management Group. (2011). Introducing the drylands. En: Global Drylands: A UN system-wide response. United Nations.
- UNESCO. (2010). Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe. Dentro del marco del proyecto Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas de América Latina y el Caribe. CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, no. 25.
- USDA. (1999). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Trad. Lutens, A. y Salazar, J.C. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina.
- Valdés, A. (2010). Como controlan la erosión las raíces de las plantas. La Ciencia y el Hombre. 23(2).
- Van Oudenhoven, A.P.E., Veerkamp, C.J., Alkemade, R. y Leemans, R. (2015). Effects of different management regimes on soil erosion and surface runoff in semi-arid to sub-humid rangelands. Journal of Arid Environments. 121, 100-111.
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Maetens, W., de Vente, J. y Verstraeten, G. (2011). Sediment yield as a desertification risk indicator. Science of the Total Environment. 409, 1715-1725.
- Wang, X., Zhao, X., Zhang, Z., Yi, L., Zuo, L., Wen, Q., Liu, F., Xu, J., Hu, S., Liu, B. (2016). Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010. Catena. 137, 256-268.

- Yang, X., Zhang, K., Jia, B. y Ci, L. (2005). Desertification assessment in China: An overview. *Journal of Arid Environments*. 63, 517-531.
- Yang, Z., Lv, Y. y Li, H. (2015). Changes of Soil Organic Carbon in Soil Aggregates under Different Stages of Desertification in the Ordos Sand Land of Inner Mongolia. *Journal of Coastal Research*. 73 (spl), 420-425.
- Zurlini, G., Jones, K.B., Riitters, K.H., Li, B. y Petrosillo, I. (2014). Early warning signals of regime shifts from cross-scale connectivity of land-cover patterns. *Ecological Indicators*. 45, 549-560.a