



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

*Monitoreo de Propiedades Físicas y Químicas de un
suelo Aluvial de un Ambiente Semiárido del Sur de
México, Para la Búsqueda de Indicadores que se
Relacionen con el Estado de Conservación
y/o Degradación del Suelo*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A

DANIEL JESÚS MUÑOZ INIESTRA

DIRECTOR DE TESIS DR. JOSÉ LÓPEZ GARCÍA

COMITÉ TUTORAL

DR. JOSÉ I. LUGO HUBP

DR. OSWALDO TÉLLEZ VALDÉS





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Quiero dedicar todo el esfuerzo y dedicación

invertido en esta tesis a mi familia:

Rosita, Edith Dolores, Ana María, Ivonne Gabriela y Daniel,

como un testimonio del cariño y respeto

que les tengo

Agradecimientos

Mi gratitud eterna al Dr. José López García, por su gran apoyo e invaluable asesoramiento en mi paso por el doctorado en geografía, y sobre todo porque me demostró que la amistad existe.

Gracias al Dr. José I. Lugo Hubp por ser una de las personas que más ha influido positivamente en mi formación académica. Me siento muy afortunado de haber sido su alumno, gracias por su amistad Dr. Lugo.

Mi agradecimiento al Dr. Oswaldo Téllez Valdés por su apoyo, paciencia y disposición, lo cual ayudo mucho a que concluyera los estudios del doctorado

Mi reconocimiento a la Dra. Laura Elena Maderrey Rascón y el Dr. Lorenzo Vázquez Selem, porque a través de la revisión y corrección que hicieron de la tesis, me enriquecieron y fortalecieron académicamente

Mi más sincero agradecimiento a mis compañeros del laboratorio de Edafología porque sin su ayuda todo hubiera sido más complicado, gracias Mayra, Panchito y Ponchito, me siento muy afortunado por haberlos conocido y de tenerlos como compañeros de trabajo.

También doy las gracias al Maestro Ángel Durán Díaz, por su asesoría en el manejo y análisis estadístico de los datos.

Mi gratitud a los Coordinadores de la UBIPRO FES- Iztacala Patricia Dávila y Rafael Lira por el apoyo y estímulo que en su momento me dieron para poder realizar la investigación.

Por último quiero agradecer mucho a todos los queridos estudiantes que participaron en el trabajo de campo, quiero decirles que su ayuda fue determinante para alcanzar esta meta, gracias: Coma, Eu, Compadrito, Omar, Robert, Yohuas, Marco, Niño y los que me faltan.

INDICE

	<i>Página</i>
I. Introducción	1
II. Justificación	6
III. Objetivos	7
3.1 Objetivo General	7
3.2 Objetivos particulares	7
3.3 Preguntas a contestar	7
3.4 Hipótesis	7
IV. Marco Conceptual	8
4.1 Conceptos teóricos	8
4.2 Las tierras secas y la degradación del suelo	13
4.3 La degradación del suelo en México	14
4.4 Las terrazas fluviales	16
V. Antecedentes	18
5.1 Antecedentes temáticos	18
5.2 Antecedentes del área de estudio	20
VI. Área de Estudio	23
6.1 Descripción de la cuenca de Zapotitlán	23
6.2 Descripción las terrazas fluviales	25
VII. Metodología	28
7.1 Estudio descriptivo general	28
7.2 Monitoreo de la dinámica edáfica	28
7.2.1 Delimitación y descripción del área de monitoreo	28
7.2.1.1 Descripción de la terraza D	30
7.2.1.2 Descripción de la terraza A	33
7.2.2. Trabajo de campo y laboratorio	35
7.2.3 Análisis de datos	35
VIII. Resultados y Discusión	36
8.1 Estudio geomorfológico general del la cuenca de Zapotitlán Salinas, Pue.	36
8.1.1 Geomorfología de la cuenca	36
8.1.2 Análisis de las formas mayores del relieve de la cuenca	39
8.2 Resultados monitoreo de la dinámica de las propiedades de los suelos	43
8.2.1 Aspectos generales	43
8.2.2 Resultados del monitoreo de las propiedades en los dos tipos de suelo y bajo las distintas condiciones de uso del suelo	44
8.2.2.1 Análisis de factor tiempo (cuatro 4 años) Vs. Propiedades	48
8.2.2.2 Análisis del factor tipo de suelo (terrazza A - suelo F. arenoso Vs terraza D - suelo F. arcillo-limoso)	51

8.2.2.3 Factor condición del sitio (suelo desnudo, suelo protegido y suelo agrícola)	54
8.2.3 Análisis de componentes principales	62
8.2.4 Análisis de clasificación	63
8.3. Análisis del comportamiento de la vegetación	65
IX Conclusión	68
X Bibliografía	71
Anexo 1. Base de datos completa de las propiedades de los suelos en los cuatro años de monitoreo	
Anexo 2. Listados florísticos de los sitios protegidos con vegetación natural	

Índice de cuadros

Cuadro 1. Diferentes condiciones que se presentan en las terrazas fluviales	30
Cuadro 2. Coordenadas de los sitios de monitoreo de la terraza D	32
Cuadro 3. Coordenadas de los sitios de monitoreo de la terraza A	33
Cuadro 4. Propiedades que se evaluaron y probaron como indicadores de la degradación del suelo	35
Cuadro 5. Atributos morfológicos de las formas mayores del relieve de la cuenca de Zapotitlán	40
Cuadro 6. Continuación de los atributos morfológicos de las formas mayores del relieve	41
Cuadro 7. Medias, desviación estándar, varianza y valores máximos y mínimos de las propiedades evaluadas durante cuatro años en los sitios de la terraza D	45
Cuadro 8. Medias, desviación estándar, varianza y valores máximos y mínimos de las propiedades evaluadas durante cuatro años en los sitios de la terraza A	46
Cuadro 9. Valores de F y p del análisis de varianza multivariado (MANOVA), considerando todas las propiedades del suelo	47
Cuadro 10. Análisis de varianza multivariado	47
Cuadro 11. Resultados de análisis de componentes principales	63

Índice de figuras

Figura 1. Etapas de la formación de una terraza fluvial	17
Figura.2. Ubicación de la cuenca de Zapotitlán y de las terrazas fluviales	23
Figura 3. Climograma estación Zapotitlán Salinas	24
Figura 4. Localización de las terrazas fluviales	25
Figura 5. Situación actual de las terrazas	26
Figura 6. Secuencia estratigráfica de una de las terrazas fluviales	27
Figura 7. Ubicación de las terrazas (A y D) en donde se realizó la investigación	29
Figura 8. Sitios de la terraza D donde se realizó el monitoreo del suelo	31
Figura 9. Fotografías donde se muestran los diferentes sitios de la terraza D	32
Figura 10. Localización de los sitios de monitoreo del suelo en la terraza A	34
Figura 11. Panorámicas de los diferentes sitios monitoreados en la terraza A	34
Figura 12. Mapa hipsométrico de la cuenca de Zapotitlán, Puebla	37
Figura 13. Mapa de pendientes de la cuenca de Zapotitlán, Puebla	37
Figura 14. Mapa Geomorfológico de la cuenca de Zapotitlán, Puebla	38
Figura 15. Formas mayores de la cuenca de Zapotitlán, Puebla	39
Figura 16. Posición de una de las terrazas fluviales dentro del contexto de la cuenca	42
Figura 17. Secciones morfológicas del suelo superficial de las dos terrazas	44
Figura 18. Variación de limo en el tiempo en los diferentes sitios de la terraza D en cuatro años de muestreo	49
Figura 19. Variación de limo en el tiempo en los diferentes sitios de la terraza A en cuatro años de muestreo	49
Figura 20. Encostramiento y sellado del suelo por incremento de limo	50
Figura 21. Terrazas A y D, sitios con diferente estratigrafía, geoquímica, suelos y morfodinámica	51
Figura. 22 Variación de la textura en los diferentes sitios y condiciones en la terraza D	53
Figura 23. Variación de la textura en los diferentes sitios y condiciones en la terraza A	53
Figura 24. Impacto de las prácticas agrícolas sobre el suelo de las terrazas fluviales de Zapotitlán	54
Figura 25. Variación de la granulometría en los diferentes sitios de la terraza D	55
Figura 26. Variación de la granulometría en los diferentes sitios de la terraza A	56
Figura 27. Densidad aparente en los distintos sitios	57
Figura 28. Infiltración acumulada de los diferentes sitios de ambas terrazas	58
Figura 29. Variación del pH en los diversos sitios	59
Figura 30. Concentración de carbonatos en los distintos sitios	60
Figura 31. Contenido de materia orgánica en los diferentes sitios	60
Figura 32. Acumulación de residuos orgánicos en los sitios protegidos	61
Figura 33. Presencia de costras microbióticas en suelos desnudos	62
Figura 34. Análisis de similitud por distancias euclidianas	64
Figura 35. Gráfico que muestra la relación entre en número de familias y especies de plantas vasculares de cada sitio	65
Figura 36. Gráfico que muestra la presencia de las principales familias por sitio	66
Figura 37. Distribución de la vegetación en la terraza D	66
Figura 38. Condición de la cobertura vegetal en la terraza A	67

I. INTRODUCCIÓN

La degradación ambiental es un de los problemas más graves a los que se enfrenta la civilización del siglo XXI, el aumento de las condiciones de aridez por causa de la degradación del ambiente, ha traído toda una serie de trastornos y modificaciones del medio natural que atentan contra la existencia de toda forma de vida, incluyendo a la especie humana. El calentamiento excesivo de la atmósfera, la escasez de agua, el movimiento violento de grandes masas de suelo, la falta de alimentos e inundaciones no son otra cosa que consecuencias directas e indirectas de la degradación del ambiente. Cuyas repercusiones se pueden constatar en la destrucción de habitats, la disminución de la biodiversidad, el decremento de la productividad de las tierras agrícolas, el incremento de la pobreza y pérdida de vidas humanas entre otras cosas. En general la degradación ambiental repercute de forma directa en el bienestar del hombre al disminuir la calidad del medio donde vive. Al reducir o desaparecer los recursos naturales, el hombre se hace más pobre y más vulnerable, por lo que tiene que emigrar ocasionado con esto grandes desajustes socioeconómicos, culturales y económicos.

De acuerdo con los datos de UNEP (1982), la degradación del medio específicamente la desertificación, afecta a la sexta parte de la población mundial y a la cuarta parte de los suelos del planeta, incidiendo más en las regiones áridas. El efecto más patente de la degradación ambiental a parte de la pobreza generalizada, es el desgaste de 3,300 millones de hectáreas de suelo productivo que se ha perdido de forma irreversible sobre todo en áreas de pastizales y matorrales.

Por otra parte, el suelo es un elemento fundamental de todo ecosistema terrestre, además de ser un recurso natural irremplazable, base de la producción de los sistemas terrestres. El suelo es el receptor principal de la agresividad climática y humana afectando sus características y calidad, limitando así su capacidad productiva y su participación en los procesos ecológicos.

Es un cuerpo frágil y no renovable en términos cortos de tiempo, cuya recuperación es muy lenta y costosa. El uso intensivo que recibe, las prácticas drásticas de manejo que se le han aplicado durante cientos o miles de años y la presión humana que lo ve sólo como una mercancía de cierto valor económico, que puede ser comprado, vendido o enajenado sin conocer su valor ecológico y productivo. Estos factores han contribuido a la aceleración de los procesos degradativos ocasionado que millones de hectáreas de suelo pierdan su potencial productivo.

El equilibrio entre las fuerzas naturales del clima (agresividad climática), la sensibilidad geomorfológica y la resistencia natural del suelo contra estas fuerzas, determina el riesgo natural de un área en particular. La acción humana puede incrementarse o disminuir de acuerdo a la resistencia natural de la tierra. Cuando los procesos de degradación se manifiestan si la intervención del hombre, por lo regular

se producen a una velocidad que está en equilibrio con la velocidad de rescilencia natural. Sin embargo la degradación acelerada de la tierra por lo regular se produce como resultado de la participación humana, de acuerdo con Stocking y Murnaghan (2003) y para el caso particular de la erosión, señala que cuando el hombre interviene el proceso se incrementa 300 veces más que cuando es por causas naturales. La degradación del suelo es un proceso que describe el fenómeno causado por el hombre que disminuye la capacidad presente y/ o capacidad futura del suelo para sustentar vida humana (FAO 2003).

En México, el problema de degradación de los suelos es muy grave y está muy extendido. En cualquier parte del territorio nacional que se visite, se puede constatar el descuido y abandono que se tiene de los suelos. Los problemas de degradación física, química y biológica se aprecian casi en todas las regiones. Los esfuerzos gubernamentales y académicos por frenar la degradación son insuficientes. Lo más crítico es que cada año que pasa, se pierden más y más hectáreas de suelo fértil por efecto de la erosión, la salinidad, la compactación, contaminación y pérdida de carbono y nutrimentos entre otros.

El principal obstáculo que se tiene para tomar medidas concretas y directas que contribuyan al control de este problema es la falta de información completa, actualizada y continua de lo que ocurre con los suelos del país. Otro problema medular es la carencia de recursos humanos formados y capacitados para enfrentar la problemática, y uno más, la falta de percepción de la mayoría de la población de que la degradación del suelo es un problema real y muy grave que atenta contra el bienestar de todos.

Todo lo anterior demuestra la falta de atención de nuestro país a un recurso de vital importancia para el desarrollo nacional, esto se refleja ya en los elevados grados de deterioro cuyas repercusiones socioeconómicas y ecológicas aun no se conocen con precisión. Desgraciadamente aun en este siglo XXI no conocemos con exactitud las características y distribución de los suelos y mucho menos de su grado y tasa de degradación. La información cartográfica de los suelos del país es antigua, desactualizada, incompleta y general.

En consecuencia es urgente primero tener un diagnóstico completo tanto a escala nacional, como regional y local que proporcione información real y objetiva de la degradación de los suelos de México. Esto permitirá por un lado, la formulación de planes articulados enfocados a contrarrestar la degradación del suelo y por el otro, establecer programas de restauración de áreas degradadas. Asimismo, estas acciones ayudarán a proteger y conservar los suelos que todavía se encuentran en buenas condiciones, impidiendo de este modo que la degradación se siga extendiendo.

La degradación del suelo es un término difícil de entender, de igual forma la capacidad productiva es muy difícil de evaluar, son procesos que ocurren de forma

gradual y con una gran lentitud, a veces de forma imperceptible para nosotros. Resulta muy complicado detectar la disminución productiva del suelo si no se cuenta con información de los rendimientos de cultivos o de producción de biomasa continua durante muchos años. La manera más confiable para saber si un suelo está perdiendo su calidad y se está degradando es conociendo la dinámica de sus propiedades, realizando un seguimiento de la calidad de las tierras por medio del monitoreo de parámetros edáficos que puedan servir como indicadores del estatus de los suelos. Después de realizar una primera evaluación es necesario continuar con un monitoreo que es esencial para evaluar la tasa de cambio de los procesos del suelo. Sin embargo, el monitoreo no es muy aceptado por las agencias de financiamiento gubernamental o privado, porque no muestran resultados a corto plazo, son caros, difíciles de ejecutar y por lo común no se ajustan a los tiempos de los políticos o tomadores de decisiones. No obstante, hay que tomar en consideración que muchos procesos naturales son lentos y graduales, en particular la variación edáfica sólo se manifiesta en décadas o inclusive en centurias o milenios. Sin embargo, sólo a través de mediciones científicas periódicas se puede contar con información confiable y obtener conclusiones válidas que permitan tomar decisiones correctas (Dregne 2002).

Diversos especialistas (IUGS 2001, Diouf y Lambin 2001, Dale y Beyeler, 2001 y FAO 1980) coinciden al señalar que hasta el momento la mejor forma de reconocer y evaluar el fenómeno de la degradación, es realizando un seguimiento de los cambios en las propiedades del suelo después de que ocurra un proceso degradativo. Esto se puede lograr sólo si se hace un seguimiento de propiedades indicadoras del estatus del suelo.

Los indicadores deberán ser de fácil manejo y respuesta clara. Un indicador es una herramienta muy valiosa que muestra cambios, tendencias y velocidades con las que ocurren los fenómenos. Además un buen indicador debe explicar con claridad la relación causa-efecto. Para que un indicador sirva como tal, debe ser fácil de medir, de rápida respuesta y sensible hacia los cambios ambientales, debe ser un elemento constitutivo constante, de amplia distribución y con ellos se debe poder evaluar magnitudes, frecuencias, tasas y tendencias de los procesos (IUGS 2001).

Para evaluar y supervisar los aspectos de la degradación del suelo, es necesario buscar indicadores específicos para cada unidad ambiental, que permitan detectar tendencias de cambio e impactos en los sistemas pedológicos y en los servicios y funciones del suelo. La comprensión de la relación entre esos indicadores es uno de los primeros requerimientos necesarios para solucionar los problemas de la degradación de la tierra.

Actualmente varios autores (FAO 1980, Oldeman 1988, Dale y Beyeler 2001 y IUGS 2001) presentan diversas propuestas para evaluar los procesos de degradación del suelo, sin embargo la mayoría de esas propuestas están diseñadas para hacer evaluaciones globales a escalas muy amplias y poco detalladas (Oldeman 1988). A

escalas regionales y locales las propuestas son muy escasas, sobre todo porque el conocimiento de la degradación de los suelos es todavía bastante limitado. Consideramos que hace falta mucho trabajo por hacer a nivel local para conocer más acerca de la degradación del suelo bajo circunstancias o ambientes particulares. Sólo los resultados de las investigaciones locales son los que pueden aportar conocimientos útiles que ayuden diseñar acciones concretas que ayuden a contrarrestar los efectos de la degradación del suelo.

Los procesos que provocan la degradación del suelo en las regiones secas no son los mismos que los que ocurren en el trópico húmedo, en consecuencia los indicadores y herramientas que se utilicen para evaluar la degradación deben ser diferentes. Particularmente para las zonas áridas y semiáridas no hay mucha información de los procesos de la degradación del suelo. Tal vez unos buenos indicadores edáficos para estas regiones pueden ser aquellos que tienen que ver con la relación suelo-agua, ya que en estos sitios el agua es un factor crítico. Otros indicadores pueden ser los relacionados con la química del suelo, etc. Pero no lo sabremos hasta que no se realicen investigaciones más detalladas en estos ambientes.

El presente trabajo no pretende evaluar el impacto de la degradación del suelo, ni evaluar los daños que ésta causa sobre los bienes y servicios producidos por el suelo para la población humana o el capital natural, ni tampoco conocer las causas de la degradación. Lo único que se pretende es conocer y comparar las propiedades y el comportamiento de dos clases de suelo, cuyo uso o condición varía desde un estado relativamente conservado protegido con vegetación natural, hasta una condición de degradación donde el suelo es incapaz de permitir el establecimiento de vegetación (suelo desnudo), pasando por un estado de uso agrícola, con el propósito de seleccionar aquellas propiedades del suelo que estén más vinculadas con la degradación y/o conservación del suelo y así proponer dichas propiedades como indicadores locales de la degradación del suelo.

El área de estudio donde se realizó la investigación es una terraza fluvial acumulativa-erosiva, es un depósito fluvial acumulado en un ambiente de alta energía en eventos esporádicos y violentos, lo que se aprecia por la estructura y composición de los rellenos aluviales (o lentes granulométricos). En la actualidad estos depósitos están en proceso de degradación natural asociada a la dinámica del río, pero acelerada por la actividad humana, por lo que la antigua planicie de inundación ha sido reducida y disectada a través de procesos cíclicos formando terrazas erosivas con diferentes niveles de alteración y grado de fragmentación, esto ha determinado la formación de un patrón recurrente de fragmentos o islas que presentan distintas condiciones de degradación y/o conservación, que se manifiestan en superficies sin vegetación y con procesos degradativos, que se alternan con áreas con suelos conservados por la vegetación natural; asimismo existen sitios que presentan estados de deterioro intermedios. Por lo que se puede observar, existe una tendencia hacia la destrucción de las terrazas y la formación de una nueva planicie de inundación como parte del proceso de ajuste del cauce fluvial a las actuales condiciones ambientales.

La investigación se hizo en dos fragmentos de terrazas fluviales que presentan un suelo superficial con textura diferente y donde las condiciones de suelo desnudo, protegido y con uso agrícola coexisten. Se pretende analizar el comportamiento y la dinámica de propiedades físicas y químicas de las dos clases de suelo a través de cuatro años de monitoreo, con la finalidad de identificar indicadores edáficos relacionados con la degradación del suelo. Consideramos que la información que se obtenga puede revelar cuáles son los gatillos que disparan el proceso de degradación del suelo, también puede indicarnos si la degradación del suelo se está dando a un ritmo rápido o lento, lo cual es fundamental para establecer programas de conservación y para identificar las áreas con mayor riesgo y aquellas que requieran una atención inmediata o a largo plazo.

El tipo de investigación que se propone realizar se puede clasificar como descriptiva, comparativa, prospectiva y longitudinal. Es descriptiva porque sólo se enfocó a describir un ambiente y una serie de procesos sin modificar o alterar el objeto de estudio; es comparativa ya que comparó el comportamiento de distintos escenarios; es prospectiva porque los conocimientos e información que se obtuvo fue directa del mundo real y es longitudinal porque se tomaron datos en diferentes tiempos dentro de un período mínimo de observación de cuatro años.

Otro aspecto importante que trata de aportar el presente trabajo es el de entender y explicar los cambios y tendencias de las propiedades edáficas, partiendo de un marco de referencia holístico, ya que consideramos que el suelo no es un cuerpo aislado sino que está en constante interacción con los demás elementos del paisaje. Es así que se realizó una investigación geomorfológica complementaria, ya que el relieve determina la existencia de topo-climas al hacer variar la distribución de la radiación solar sobre la superficie terrestre, lo cual afecta al suelo. También el relieve influye en la distribución de los suelos. El tipo de suelo, espesor y su susceptibilidad a la erosión tienen un fuerte control geomorfológico (Zvonkova 1970). Los métodos morfométricos de la geomorfología son útiles en el análisis de los procesos que ocurren en las laderas. Con el aumento de la inclinación de la superficie terrestre, aumentan las probabilidades de la erosión hídrica del suelo. El aumento del ángulo de la pendiente en cuatro veces duplica la velocidad del escurrimiento, con lo que aumenta en sesenta y cuatro veces el volumen de partículas transportadas. En pendientes de 2°-3° aumenta el lavado de los suelos, disminuye la humedad y se retrasa el desarrollo de la vegetación, en pendientes de 3°-4° aumenta la erosión.

II JUSTIFICACIÓN

Al hacer la revisión bibliográfica del tema de la degradación ambiental, es notorio que en la mayoría de los casos los esfuerzos se han dirigido a evaluar el estado actual de la degradación, y sobre todo, a valorar el problema de la contaminación, el calentamiento global, cambio climático etc. No obstante, también hay trabajos dirigidos a medir los impactos ambientales que tiene la degradación y establecer relaciones causa-efecto. Muchas de las investigaciones son muy generales, de escalas pequeñas, con baja precisión y parciales en cuanto a su dimensión de espacio y tiempo. En resumen, sólo se conocen las cuestiones generales de los procesos y sus consecuencias.

Los aspectos finos e íntimos de la degradación apenas se están estudiando, aún se conoce poco de las tendencias de los cambios que se dan en las propiedades de los suelos. Las preguntas son muchas: ¿qué propiedades son las más sensibles y cuáles más tolerantes?, ¿qué repercusiones ecológicas se generan?, ¿cuál es la velocidad con la que ocurre el proceso de degradación bajo ciertas condiciones particulares?, ¿de qué manera el calentamiento global está afectando las propiedades de los suelos?, ¿qué tipo de cambios son realmente consecuencia de la morfodinámica natural o de la influencia humana?. Este último aspecto es de gran importancia ya que en muchos casos no sabemos si la degradación de algún sitio es consecuencia de las acciones del presente o fueron consecuencia de impactos generados en el pasado reciente. Al respecto se cita en la literatura lugares que fueron dañados en el pasado y que actualmente se encuentran en una etapa de estabilización y recuperación.

Por otra parte, el conocer si la degradación del suelo se está dando a un ritmo rápido o lento es fundamental para establecer programas de conservación y para detectar las áreas con mayor riesgo y aquellas que requieran una atención inmediata a largo plazo. Asimismo, ayudará a desarrollar tecnologías para la restauración de áreas degradadas. Sólo cuando se evalúe objetivamente el problema y se conozcan bien de las causas que lo generan, será posible diseñar medidas adecuadas para su control (FAO 1980). Asimismo, es de igual relevancia conocer cuál es la respuesta que ofrecen suelos de distinta morfología ante los procesos degradativos.

Por último, en muchos de los trabajos sobre el tema de la degradación del suelo se enfocan casi exclusivamente a evaluar únicamente lo que ocurre dentro del suelo; sin embargo, en el presente proyecto consideramos que el suelo no es un cuerpo aislado sino que forma parte activa del paisaje con el cual interactúa constantemente. Es así que se propone estudiar el fenómeno de la degradación del suelo desde una perspectiva más integral, considerando también los aspectos geomorfológicos y de la vegetación. Para lograr esto, se propone buscar indicadores relacionados con la degradación del suelo, porque los indicadores son herramientas valiosas que permiten evaluar y dar seguimiento a los cambios ambientales.

III OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Monitorear durante cuatro años y comparar el comportamiento de propiedades físicas y químicas de dos tipos de suelo aluvial, cuyo uso o condición varía desde un estado relativamente conservado protegido con vegetación natural, hasta una condición de degradación donde el suelo es incapaz de permitir el establecimiento de vegetación (suelo desnudo), incluyendo también el uso agrícola, con el propósito de seleccionar aquellas propiedades del suelo que estén más relacionadas con la condición del lugar y proponerlas como indicadores locales de la degradación del suelo.

3.2 Objetivos particulares

- Monitorear a través del tiempo, la dinámica de 18 propiedades edáficas para analizar la variación y tendencia de los cambios, bajo la influencia de tres factores:
 - a. *Tiempo*: Cuatro años de monitoreo, muestreando cada tres meses.
 - b. *Dos clases de suelo*: franco arenoso y franco arcillo-limoso
 - c. *Condición de uso*: Suelo desnudo, Suelo protegido con vegetación natural y Suelo agrícola.
- Aplicar procedimientos estadísticos para identificar las distintas relaciones entre los parámetros evaluados y los factores de comparación: tiempo, clase de suelo, condición del sitio (suelo desnudo, protegido con vegetación natural y suelo agrícola).
- Identificar y seleccionar aquellas propiedades de los suelos que funcionen mejor como indicadores de sensibilidad y/o estabilidad y degradación y/o conservación, bajo las condiciones del área de estudio.
- Integrar la información para establecer una secuencia hipotética de la degradación de una terraza del área estudiada.

3.3 Preguntas a contestar:

- ¿Cuales son los gatillos que disparan el proceso de degradación del suelo?
- ¿La degradación del suelo se está dando a un ritmo rápido o lento?
- ¿Qué propiedades son las más sensibles para cada ambiente?
- ¿Qué propiedades del suelo son los mejores indicadores del estado de degradación o conservación de los suelos estudiados?

3.4 Hipótesis

Los suelos arcillo-limosos y franco arenosos presentan una morfología y funcionamiento distinto, y bajo condiciones ambientales similares tendrán una respuesta diferencial ante el proceso de degradación ambiental que se manifestará en cambios en sus propiedades físicas, químicas y morfológicas.

IV MARCO CONEPTUAL

4.1 Conceptos teóricos

Cuando se toca el tema de la degradación ambiental a menudo surge una serie de confusiones en cuanto a la terminología que se utiliza, se escuchan términos como degradación de suelo, degradación de la tierra, desertificación y desertización. Por eso es conveniente empezar este marco de referencia temático sobre la degradación del suelo, presentando algunos conceptos útiles, con la finalidad de evitar confusiones o malas interpretaciones de la terminología empleada en este trabajo y sobre todo para ubicar bien la idea central del tema aquí abordado.

Se empezará por definir la palabra “**suelo**”, el cual es conceptualizado como un cuerpo superficial que se encuentra en la parte más externa de la corteza terrestre continental y que está formado por una mezcla de componentes minerales y orgánicos, pero que también tiene una fase líquida y otra gaseosa. Este cuerpo es tridimensional, dinámico y en continua transformación determinada por la influencia del clima y los organismos, condicionada por la acción del relieve y la litología a través del tiempo. Por su posición el suelo es la interfaz o conexión entre la atmósfera, la hidrosfera, la litosfera y la biosfera. Las funciones del suelo pueden ser proporcionar alimentos y fibras, servir como amortiguador entre la atmósfera y los recursos subterráneos, proporcionar recursos minerales y orgánicos. Las funciones del suelo incluyen también los servicios tales como almacenar carbón, agua, nutrimentos, depurar los ecosistemas y preservar la diversidad biológica (FAO 2003, Porta 2003).

“**Degradación del suelo**” es un proceso que describe el fenómeno causado por el hombre que disminuye la capacidad presente y/ o capacidad futura del suelo para sustentar vida (FAO 2000). También puede entenderse como los procesos físicos, químicos y biológicos que disminuyen la utilidad del suelo. El resultado de la degradación del suelo es una disminución de su potencial productivo, como consecuencia de la reducción de su fertilidad o calidad. La degradación de los suelos se refiere a los procesos desencadenados por las actividades humanas que reducen su capacidad actual y/o futura para sostener ecosistemas naturales o manejados, para mantener o mejorar la calidad del aire y agua, y para preservar la salud humana.

Las consecuencias ambientales típicas de la degradación son la erosión acelerada, reducción en la fertilidad, pérdida de la vegetación, disminución en la capacidad de retención del agua, salinización de los suelos e inundaciones (AG/UNEP 1987). El tipo de degradación del suelo, se refiere al proceso que causa la degradación: desplazamiento de material del suelo por agua y viento, degradación *in situ* por procesos físicos, químicos y biológicos (FAO 1980). La tasa de degradación del suelo se refiere al estado actual de la degradación (ligera, moderada y severa) y por último el promedio de la degradación del suelo en el pasado reciente, se refiere a la rapidez del proceso de degradación, estimado y promediado en los últimos 5 a 10 años (lento, medio y rápido) (FAO 1980).

Se reconocen dos categorías generales de procesos de degradación provocados por el hombre, la primera es a consecuencia del desplazamiento del material del suelo, en esta categoría se pueden distinguir por una parte los efectos o daños que se causan en el mismo lugar y que afectan áreas cercanas al lugar, aquí se incluye los depósitos de sedimentos locales producidos por la erosión, y por otra parte, están los efectos fuera del lugar que se manifiestan a una considerable distancia del sitio (por lo menos a un kilómetro de distancia). La segunda categoría describe los tipos de degradación del suelo como resultado del deterioro interno del suelo, en esta categoría sólo se reconocen los efectos *in situ* en suelos que han sido abandonados o forzados a usos muy intensivos. No se refiere a las fluctuaciones cíclicas de los procesos químicos, físicos del suelo y/o a las condiciones biológicas relativamente estables de sistemas agrícolas, en las que se maneja la tierra para mantener su productividad, tampoco se refiere al cambio gradual en la composición química como resultado de los procesos de formación del suelo (Oldeman 1988 y UN-CCD 2005).

Otro término muy utilizado cuando se habla de la degradación ambiental es el de la “**degradación de la tierra**”. Se ha escrito mucho acerca de este tema y a menudo se piensa que es un sinónimo de la degradación del suelo; sin embargo no es así. En primer lugar se tiene que la palabra “**tierra**” es definida por la FAO (2000) como un área delimitada que reúne todos los atributos de la biosfera inmediatamente por encima o por debajo de la superficie terrestre, incluyendo el suelo, el terreno, la superficie hidrológica, el clima cerca de la superficie, los sedimentos y las reservas de agua asociadas, los recursos biológicos así como los modelos de establecimientos humanos y la infraestructura resultante de las actividades humanas. Esta definición enfatiza los múltiples atributos de la tierra e implícitamente, las relaciones funcionales/sistémicas que existen entre esos atributos.

Sin embargo si se analiza con detenimiento esta definición, nos percatamos que es confusa y poco clara. ¿Qué es una superficie que reúne todos los atributos de la biosfera inmediatamente por encima o por debajo de la superficie? ¿Cómo se debe interpretar esto?, ¿Cuáles son los atributos de la biosfera por arriba y por abajo?. En México el significado de la palabra tierra tiene un significado muy especial, para los mexicanos la tierra es el sitio donde se nace, es el paisaje en su conjunto con su clima, montañas o valles, ríos y suelos, es decir la tierra es un todo y no sólo está referida al suelo. Desde el particular punto de vista del autor, la tierra debe conceptualizarse como “un espacio geográfico específico, con un paisaje particular, con una historia natural y cultural propia, donde se dan una serie de relaciones entre el hombre y la naturaleza, mismas que influyen en la transformación de dicho espacio, la tierra es dinámica y siempre está en continuo cambio”. El conocimiento de las relaciones entre los componentes de la tierra (clima, topografía, suelo, cobertura de la tierra, uso actual de la tierra, etc.) permite el análisis de los procesos dinámicos que intervienen en la degradación de la tierra.

Las funciones de la tierra pueden ser proporcionar alimentos y fibras, servir como amortiguador entre la atmósfera y los recursos subterráneos, proporcionar recursos minerales y orgánicos, ser un apoyo para la infraestructura y ser la base para la

memoria del conocimiento arqueológico. Las funciones de la tierra incluyen también los servicios tales como proporcionar un medio de vida para el hombre, dar oportunidades para el turismo, almacenar carbón, agua, nutrimentos y preservar la diversidad biológica (FAO 2003). Entonces la degradación de la tierra empieza cuando la tierra deja de mantener su productividad y el hombre deja de recibir los beneficios que le proporciona.

Al respecto, la Convención de las Naciones Unidas para el Combate de la Desertificación (CCD) creada por el programa ambiental de Naciones Unidas, propone que la **degradación de la tierra** que ocurre en las zonas áridas, semiáridas y secas subhúmedas derivadas fundamentalmente de los efectos negativos de las actividades humanas debe ser denominada como “**Desertificación**” (UNEP 1995). Para FAO (2003) la desertificación se define como “La expresión general de los procesos económicos y sociales, así como de los naturales e incluidos por el hombre, que rompen el equilibrio del suelo, la vegetación, el aire y el agua, ruptura que ocasiona la disminución o destrucción del potencial biológico de la tierra y la degradación de las condiciones de vida”. Para Dregne (2002) la desertificación es el empobrecimiento de ecosistemas terrestres bajo el impacto del hombre. Indica que este proceso se puede medir por la reducción en la productividad de las plantas deseables, alteraciones indeseables en la biomasa, afectación de la biodiversidad, deterioro acelerado del suelo y disminución de las reservas hídricas.

El proceso de la desertificación fue descrito por primera vez por un biólogo francés al estudiar la disminución de la productividad de pastizales en el sureste húmedo de Túnez (Lavauden 1927). No obstante el término desertificación fue introducido hasta 1949 por el botánico y ecólogo también francés Aubreville al observar el reemplazo progresivo del bosque tropical y subtropical de África por la sabana, un proceso que primero llamó sabanización y después desertificación (Verstraete 1986, Dregne 2002 y Le Houérou 1968 y 2002).

La desertificación es un proceso global y holístico que afecta la productividad biológica de la tierra, es la consecuencia o el resultado del impacto negativo de la actividad humana que causa la incapacidad de la tierra para sostener adecuadamente las funciones económicas y/o las funciones ecológicas originales (UNEP 1995 y Verstraete 1986). La desertificación no está referida a la expansión de los desiertos existentes, sino a la transformación de un área que fue productiva, en un área cuyo potencial biológico ha desaparecido o disminuido drásticamente a tal grado que el sistema natural no es capaz de recuperarse por sí sólo. Sucede porque los ecosistemas de las tierras áridas que cubren una tercera parte del total del planeta, son en extremo vulnerables a la sobreexplotación y al uso inapropiado de la tierra.

La desertificación debe entenderse como la disminución o pérdida de la productividad biológica de la tierra, que puede manifestarse por una reducción de la biodiversidad o por el remplazo de las especies nativas por otras especies de escaso valor productivo para el hombre; todo esto ocasionado por el deterioro del suelo y el incremento de la aridez del medio. La desertificación siempre tiene que ver con la pérdida en la cantidad y calidad de la biodiversidad, el agua y el suelo.

En general se consideran siete procesos principales que conducen a la desertificación (Dregne 2002 y UNEP 1995), los cuatro primeros se consideran como primarios (con efecto amplio y de fuerte impacto) y los tres restantes como secundarios (con efectos más locales).

- 1) Degradación de la cubierta vegetal
- 2) Erosión hídrica
- 3) Erosión eólica
- 4) Reducción de la materia orgánica del suelo, que se da cuando la cubierta vegetal que provee los nutrientes orgánicos al suelo, es removida
- 5) Salinización y/o alcalinización
- 6) Encostramiento y compactación del suelo. Estos procesos ocurren como consecuencia de los procesos primarios: escasez de materia orgánica, uso intensivo, sobre-pastoreo, etc.
- 7) Acumulación de sustancias tóxicas

La presencia o la ausencia de desiertos, zonas de cultivo o agostaderos no necesariamente tienen que estar relacionados con la desertificación, ya que esta puede aparecer en cualquier parte de las regiones secas, áridas, semiáridas o sub-húmedas donde hay un mal manejo de la tierra. La desertificación en lo general empieza como punto en el paisaje donde el abuso de la tierra ha sido excesivo. De ese punto que puede ser un abrevadero, un campo cultivado, una mina, un camino o un área deforestada, la degradación se extiende a su alrededor hasta fusionarse con otros puntos y formar áreas de mayor tamaño, de esta forma es como avanza la desertificación (Dregne 2002).

El concepto de desertificación reconoce que la degradación de la tierra es un fenómeno que implica continuos cambios, desde grados ligeros hasta muy severos pasando por toda una serie de condiciones intermedias determinadas por la intensidad de las actividades humanas y la sensibilidad de los paisajes. Hay una falsa idea en el sentido de que las sequías son las responsables de la desertificación, las sequías sólo aumentan la probabilidad que la desertificación se incremente sobre todo en tierras donde no hay riego si se excede la capacidad de carga. Sin embargo, cuando la tierra es bien-manejada se recuperará de las sequías cuando las lluvias retornen. La combinación mortal se da cuando el abuso de la tierra se mantiene durante períodos largos que coinciden con sequías prolongadas (UNEP 1995).

Para evaluar la disminución o pérdida de la productividad o de las funciones de la tierra, se requiere del conocimiento de cuanto era esa productividad y esas funciones en el pasado inmediato. Una vez más, se encuentra la necesidad de una evaluación del valor de los bienes y servicios proporcionados por la tierra que está siendo degradada tal como se expresa a través de su productividad y utilidad. Para esto es necesario la utilización de indicadores específicos que permitan una descripción de los objetivos y el impacto sobre los bienes y servicios producidos por la desertificación (FAO 2003). La evaluación de la desertificación requiere del apoyo de un gran

número de disciplinas de las ciencias naturales y del campo económico, social y ambiental, así como también de los usuarios de la tierra y de todos los interesados en el uso de la tierra.

En la región de América Latina y el Caribe se reportan grandes extensiones secas que están en vías de desertificarse, en países como México, Argentina, Bolivia, Perú y Chile. En la región mesoamericana donde se localiza nuestro país, hay más de 63 millones de hectáreas ya están afectadas y cerca del 88% de la tierra restante está amenazada por este fenómeno (UNEP 1997).

Por otra parte el término “**Desertización**” es definido por Le HoueÂ rou (2002) como la expansión irreversible de la tierra árida que da como resultado formas y paisajes similares a los de los desiertos y que estas formas no existían en pasado reciente. Es decir la desertización da lugar a la expansión de los desiertos, la mayor parte de la desertización se da en las zonas que bordean a los desiertos. La desertización es el resultado de las oscilaciones cíclicas de la productividad de la vegetación en los márgenes del desierto ("expansión o contracción del desierto"), revelado por datos obtenidos por satélite y el análisis de las fluctuaciones climáticas. En épocas de sequía estos lugares se deshidratan, pierden vegetación y buena parte de su suelo es arrastrado por el viento y otros agentes erosivos, sin embargo en la época de lluvia estas áreas se vuelven a hidratar, la vegetación se recupera y el desierto retrocede. Pero cuando este fenómeno natural se ve alterado por las actividades humanas (mal manejo prolongado durante mucho tiempo), el suelo pierde su fertilidad y se hace más propenso a la erosión, perdiendo poco a poco su capacidad para sostener las plantas y organismos. De este modo el desierto se extiende o crece irreversiblemente generándose así el fenómeno de la desertización Le HoueÂ rou (2002).

No es fácil determinar qué superficies se encuentran sometidas a desertización provocada por el hombre. En muchos casos es un proceso natural que sigue las oscilaciones climáticas; en unas épocas los desiertos crecen y en otras retroceden, dependiendo de la variación climática (sequías prolongadas) (Le HoueÂ rou 2002). La desertización es acelerada por el hombre a causa del mal manejo y/o sobreexplotación los recursos naturales a través del incremento en las condiciones de aridez de un sitio.

Una de las primeras etapas de la desertización es el mal manejo de la tierra y la ocurrencia de sequías prolongadas, que ocasionan la destrucción o retroceso de la cubierta vegetal; pero no es necesariamente la única forma de disparar el fenómeno, también puede ser a causada por un proceso de gradual de aridización natural. La segunda etapa comienza cuando el suelo deja de ser fértil y se encuentra despojado de su cubierta vegetal, esto determina que el agua y el viento lo erosionen más rápido hasta llegar a la roca.

Le HoueÂ rou (2002) científico francés que más ha investigado el proceso de la desertización, explica con claridad cuales son las causas y la secuencia del

fenómeno, estas conclusiones las obtuvo de las múltiples investigaciones que realizó en diferentes regiones de África. Le HoueÂ rou indica que la principal causa que desencadena la desertización es la destrucción de vegetación perenne y de la biomasa en general, esto provoca de inmediato alteraciones en el suelo haciéndolo susceptible a la degradación por: compactación, erosión, sedimentación, encharcamiento, alcalinización y salinización. La destrucción de la cobertura vegetal desencadena los siguientes procesos:

1. La reducción de la biomasa determina una disminución de la producción de litter y de residuos orgánicos en la parte superior del suelo, esto provoca un decremento de la materia orgánica del suelo.
2. La reducción de materia orgánica debilita la estabilidad estructural, permitiendo la destrucción de los agregados, lo que afecta al funcionamiento físico del suelo.
3. La destrucción de la estructura hace que el suelo se compacte. La alta compactación puede hacer que el suelo se vuelva improductivo y en casos extremos se vuelva estéril.
4. La inestabilidad de los agregados del suelo en combinación con la baja densidad de cobertura de plantas, provoca que la superficie del suelo se encoste y selle, lo que interrumpe el intercambio gaseoso e impide la entrada del agua al interior del suelo; sobre todo si el suelo es limoso o franco. En suelos arenosos se pueden formar costras microbióticas de líquenes y cianobacterias, lo cual afecta también la retención del agua.
5. La superficie del suelo es casi siempre impermeable, esto incrementa el escurrimiento y la erosión; al mismo tiempo decrece el suministro y almacenamiento de agua y se crea un ambiente más seco a consecuencia de la aridez edáfica. El sellado disminuye las reservas de hídricas entre un 50 o 75% e incrementa la erosión por escurrimiento (Le HoueÂ rou 2002).

De acuerdo a lo anterior el presente trabajo sólo está enfocado a evaluar la dinámica de las propiedades del suelo y su relación con la degradación del mismo en una zona semiárida, no es un estudio sobre la degradación de la tierra ni de la desertización aunque el fenómeno de la degradación del suelo sí forma parte de los procesos generales de la degradación del ambiente (desertificación y desertización).

4.2 Las tierras secas y la degradación del suelo

La degradación del medio constituye uno de los problemas más grandes de los países de América Latina y frente a esto llama la atención la insuficiencia de información sobre los procesos de deterioro natural, así como los mecanismos involucrados en el mantenimiento de la diversidad en las comunidades áridas (Valiente-Banuet 1992). Así los estudios encaminados al conocimiento de los procesos involucrados en el deterioro son la premisa metodológica fundamental para el desarrollo de tecnologías que permitan la recuperación y conservación de los sistemas naturales.

En México más del 80% de su extensión territorial se encuentra afectada, presentado diversos grados de deterioro ambiental, entre los ambientes más dañados están las zonas áridas, las cuales ocupan el 60% del territorio nacional (Rzedowski 1978), constituyendo uno de los ecosistemas que dominan el escenario ambiental del país. Los ecosistemas áridos son reconocidos por su fragilidad al deterioro, conociéndose que en el mundo al menos seis millones de hectáreas se pierden por año. El 70% de las áreas ocupadas por zonas áridas en el mundo (excluyendo a los desiertos hiperáridos) están deterioradas, principalmente por aridificación natural (desertización por cambios climáticos globales) y por sobre-explotación o explotación inadecuada o por la conjunción de ambos factores. Es además en las zonas áridas, donde las estadísticas del proceso de deterioro son más escasas y en donde menos se conocen los procesos que llevan al deterioro y las formas de revertirlo (Mostafa *et al.* 1992).

Las tierras áridas del mundo son ecosistemas muy importantes incluyen tierras de pastoreo, agrícolas, de gran diversidad biológica y áreas urbanas, constituyen cerca del 32 por ciento de las tierras del planeta. Las tierras áridas albergan a cerca de 2000 millones de personas. Muchos de esos habitantes de las tierras áridas son pastores de ganado y pequeños agricultores y otros viven en zonas urbanizadas (UNEP 1997). Algunos ejemplos de bienes y servicios importantes de las tierras áridas incluyen: forraje y ganado, alimentos, leña, conservación de la biodiversidad, turismo y recreación, entre otros.

4.3 La degradación del suelo en México

Ya que en México más de la mitad del territorio está dentro de la categoría de las tierras secas, la desertificación y en particular la degradación del suelo forman parte de un problema de orden nacional. Los problemas sociales, económicos, de seguridad alimenticia, migraciones y la estabilidad política están vinculados con la degradación del suelo y con otras cuestiones ambientales como son el sobrecalentamiento global, la diversidad biológica y el abastecimiento de agua potable (SEMARNAT 2002b). La degradación de los suelos en México está muy relacionada con la deforestación del territorio y se inicia prácticamente con la colonización española, cuando grandes superficies boscosas fueron deforestadas para dar impulso de la actividad minera, actividad económica más importante en aquel tiempo (Roldan-Parrodi & Trueba-Dávalos 1978). La madera era usada como combustible y como insumo de construcción, la mayoría de las minas productoras eran para la extracción de metales. Años más tarde en el siglo XIX la deforestación se intensificó con la industrialización del país, se necesitó de mucho más madera para la construcción de la red ferroviaria durante el porfiriato. Después con la expansión ganadera principalmente hacia el norte y sur del país, vino un deterioro muy severo e irreversible que afectó a muchos ecosistemas, grandes extensiones de selvas, matorrales y pastizales fueron borrados o dañados a consecuencia del mal manejo ganadero. La ganadería en México es de tipo extensiva y poco tecnificada (Roldan-Parrodi 1981 y Trueba-Dávalos 1978, citados por CONAZA 1993).

Se ha identificado que la mayor degradación de los suelos del país, se debe a la deforestación asociada con cambios en el uso del suelo hacia las actividades agropecuarias. Aproximadamente la mitad de las zonas deforestadas o que cambian de uso, se dedican a la actividad ganadera bajo condiciones de sobre-pastoreo. El cambio de uso del suelo genera deterioro, pero éste se acelera más en zonas montañosas o en presencia de sobre-pastoreo (SEMARNAT 2002b y c).

Otras causas del deterioro de los suelos están relacionadas con las actividades agrícolas, las malas prácticas agrícolas en las tierras de secano también han contribuido con mucho a la degradación de los suelos. Por lo regular en estos sistemas agrícolas las prácticas de fertilización o abonamiento son escasas, así como las de control a la erosión. Esto ha determinado el agotamiento de muchas tierras agrícolas donde la producción agrícola va en descenso año tras año, por la utilización de sistemas de producción inadecuados, tales como la aplicación excesiva de riego y fertilizantes, la quema de residuos de cosecha, el exceso de labranza y la falta de prácticas de conservación de suelo y agua (SEMARNAT 2002b y c).

Estas formas de explotación de los recursos naturales del país ha provocado que el 47.7% de los suelos presenten problemas de degradación en diferentes grados (SEMARNAT 2002b). La cuarta parte de las regiones más dañadas se encuentra en áreas marginadas. Por otra parte, los estados económicamente más desarrollados son los que tienen menos suelos deteriorados. La degradación del suelo es entonces, el resultado de factores ambientales, sociales y económicos.

La erosión (eólica e hídrica) es la causa más prominente en la degradación del suelo, cerca del 80% de todo el territorio nacional es afectado en alguna medida por la erosión favorecida por las actividades humanas. Si bien es posible seguir desarrollando actividades agropecuarias y forestales en estas áreas, su productividad va declinando con el tiempo. La erosión hídrica actúa a dos niveles: uno es la erosión superficial que se da cuando el agua fluye en forma difusa y homogénea por una pendiente, arrastrando la capa superior del suelo que es la que más nutrientes y materia orgánica, al eliminarse esta capa el suelo va perdiendo poco a poco su fertilidad. La otra forma de erosión hídrica es la concentrada o lineal, donde el flujo del agua se concentra en canales o cárcavas, aquí la erosión es más rápida ya que va cortando el suelo y rocas deformando el terreno. Cuando el viento es el agente erosivo, se reconocen las mismas modalidades de erosión superficial más la deformación del terreno. Por otra parte, la degradación química (salinidad, alcalinidad, acidez, etc.) afecta al 16.36% de la superficie. Otro tipo de degradación que se presenta con mucha frecuencia es la producida por la declinación de la fertilidad y la reducción del contenido de materia orgánica, estas modalidades son poco perceptibles sin embargo su efecto es catastrófico, ya que literalmente van matando al suelo poco a poco, haciendo que la tierra se vuelva improductiva (SEMARNAT 2002b y c).

4.4 Las terrazas fluviales

Debido a que la presente investigación se desarrolló sobre terrazas fluviales, resulta importante mencionar algunos aspectos básicos concernientes a las terrazas fluviales. Estas terrazas son un componente muy importante en el funcionamiento de las cuencas hidrológicas, representan la transición o interface entre las corrientes de agua y las porciones terrestres contiguas. Las terrazas y planicies aluviales han jugado un papel muy importante para el desarrollo de la humanidad, es de todos conocido que las primeras civilizaciones se establecieron sobre planicies y terrazas de río, la riqueza de Babilonia y el Egipto antiguo, la extensión de China y la concentración popular de la India y otras partes del mundo han sido asociadas con suelos aluviales. Las terrazas fluviales son la antigua planicie de inundación que ha sido levantada con respecto al cauce de un valle fluvial, por movimientos tectónicos o por un descenso brusco del nivel base de erosión. Pueden ser acumulativas, erosivas o mixtas. También las superficies topográficas que forman las terrazas fluviales, marcan la localización de lechos de antiguos valles, en ocasiones están formadas por diversas series de niveles o pisos, correspondientes a otros tantos períodos de rejuvenecimiento. Su presencia es indicadora de los cambios que ha tenido el cauce (Derrau 1981, Rosgen 1994, Charlton 2007).

Se forman cuando una corriente fluvial rebasa el nivel normal e empieza a inundar los alrededores, depositando y esparciendo la carga de sedimentos formando así poco a poco una planicie de inundación, a esta fase se le denomina “agradación”. Posteriormente cuando cambia el régimen del río y el caudal disminuye, el río pierde energía y capacidad de inundar, entonces la planicie deja de crecer, a esta fase se le denomina “degradación”. Durante esta fase la corriente empieza a erosionar rápidamente hacia abajo, de tal modo que el aluvión previamente depositado es cortado produciendo la separación de ambos márgenes del cauce formando así las terrazas fluviales. A medida que el río madura, el cauce se ensancha y la terraza retrocede hasta el punto que puede ser destruida por completo (Fig. 1) (Zinck 1970, Derrau 1981, Charlton 2007). Técnicamente, las terrazas fluviales son geoformas alargadas y estrechas, con superficie plana. Por su origen exógeno, presentan suelos profundos y fértiles debido al enriquecimiento continuo de sedimentos ricos en materia orgánica y minerales. Gracias a la naturaleza y espesor que tienen, las terrazas actúan como esponjas naturales ya que pueden almacenar grandes volúmenes de agua, misma que libera de forma gradual regulando así la recarga del ecosistema, sobre todo en los meses más secos del año. Por lo regular los suelos de terrazas son productivos, especialmente porque su fertilidad es en general más alta que la de los suelos circundantes FAO/UNESCO (1994).

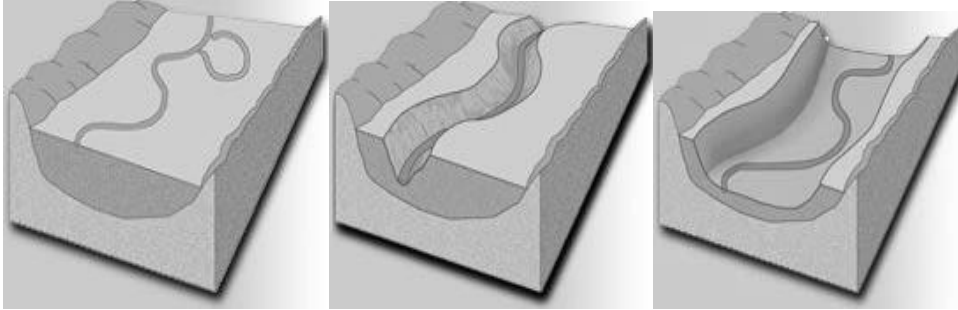


Figura 1. Etapas de la formación de una terraza fluvial, se inicia con la formación de la planicie de inundación, después el eciamiento del río por erosión vertical y por último el ensanchamiento y la formación de las terrazas. (Tomado de César Martínez www.mundofree.com.ctma)

V ANTECEDENTES

5.1 Antecedentes temáticos

En 1985, el PNUMA, la FAO y la UNESCO inician un proyecto donde el objetivo principal fue el de crear una metodología para evaluar a escala global la degradación de los suelos.

Oldeman en 1988, desarrolla una metodología denominada GLASOD (Global Assessment of Soil Degradation), que tiene como propósito evaluar a nivel mundial la degradación del suelo, en ella se reconocen dos grandes categorías de procesos de degradación; los relacionados con el desplazamiento del material del suelo, cuyos tipos específicos son la *erosión hídrica* y la *erosión eólica* y los relacionados con el deterioro interno del suelo que puede ser tanto *físico y químico* como *biológico*. Además del tipo de degradación, se estableció su área de influencia y las causas principales que la provocan.

Sandoval y Estrada en 1988, efectuaron una evaluación de la desertificación en el Municipio de Cuauhtémoc, Colima. Utilizaron fotografías aéreas y cartas topográficas basándose en los criterios de FAO 1980 y 1983; sin embargo se dieron cuenta de las limitaciones que tienen las metodologías que usaron en la evaluación de áreas pequeñas.

En 1988 Albaladejo *et al.* estudian la degradación del suelo y la desertificación, inducida por la remoción de la vegetación en un ambiente semiárido. Encontraron que en los sitios en donde la vegetación fue removida, disminuyó mucho la materia orgánica del suelo, también disminuyeron los agregados estables y se incrementó la densidad aparente.

Jacinto y Estrada (1990) hicieron una estimación del riesgo a la degradación de los suelos en el Estado de Michoacán. El trabajo se realizó con la finalidad de contar con información de tipo cualitativo, que pueda indicar la clase y los valores numéricos del riesgo de degradación por: erosión hídrica, lixiviación de bases, mineralización del humus, aumento de la densidad aparente, salinización y sodificación.

En 1993 Younes y Adbel- Hady evaluaron los procesos de degradación de la parte media del valle del Nilo en Egipto, usaron como herramienta básica un sistema de Información geográfica y técnicas de percepción remota, a través de datos provenientes de las propiedades del suelo, cobertura de la tierra y usos del suelo.

Scott, Gardner y Ciolkoz (1995) publican un trabajo de cronosecuencia de suelos de terrazas del río Susquehanna en Pensilvania E.U., estableciendo correlaciones de tiempo de formación de las terrazas con las características morfológicas de los suelos.

Landa y colaboradores en 1997 llevan a cabo un estudio del deterioro ambiental en un área rural de México, primero realizan análisis de los fundamentos teóricos y

conceptos implícitos en el problema de la degradación del medio ambiente, señalan que en los estudios de la degradación ambiental es necesario incluir el análisis de los componentes abiótico, biótico y los procesos socio-económicos.

Diouf y Lambin en 2000 monitorean los cambios de paisajes semiáridos del Senegal, señalan que los mejores indicadores para evaluar la degradación de las tierras secas son 1) el decremento de la resiliencia de la vegetación en las sequías, 2) disminución en la eficiencia del uso de la lluvia y 3) modificación de la composición florística.

Dale y Beyeler (2001), hacen algunas recomendaciones para la selección y uso de indicadores ecológicos, mencionan que la principal función de los indicadores es la de registrar pequeñas señales de cambio en los ecosistemas, también sugieren que los indicadores deben estar relacionados con aspectos estructurales, de composición y función de los ecosistemas. Hacen mención que el suelo y geomorfología deben de estar siempre como parte de los paquetes de indicadores relacionados con la estructura de los ecosistemas.

Mateo y Ortiz en 2001, hacen una revisión de conceptos relacionados con la degradación geoecológica y proponen un sistema para clasificar los paisajes de acuerdo a su nivel de degradación.

En el año 2002 surge el proyecto *Evaluación de la Degradación de Tierras en Zonas Áridas* (LADA), financiado por el Fondo Mundial para el Ambiente (*Global Environmental Fund – GEF*) junto con UNEP y el mecanismo global (GM), ejecutado por la FAO. Este proyecto tiene como objetivo principal fortalecer los apoyos para afrontar de una manera global el problema de la degradación de la tierra, tal como ha sido previsto por la Convención de las Naciones Unidas para el Combate de la Desertificación (UN-CCD).

Stocking y Murnaghan (2003), publican un manual para la evaluación de la degradación de las tierras. Realizan un análisis muy completo del problema de la degradación ambiental y proponen una serie de indicadores prácticos para evaluarla.

La UN-CCD (2005) realizó un estudio piloto a nivel mundial en dos localidades de México, la primera de ellas fue en el poblado de Salinas, San Luis Potosí (4.445 ha) y la segunda en el poblado Las Casitas Puebla, (3.100 ha). El estudio tenía por objeto analizar los procesos físicos así como los factores sociales, culturales, políticos y económicos vinculados con la degradación de las tierras y el suelo. Sin embargo se utilizaron tantos indicadores, que resultó muy complicado analizar e interpretar los resultados. Si bien el estudio se realizó y se resumió en forma adecuada, demostró claramente que no es práctico ni funcional hacer una evaluación tan compleja con tantas variables.

Caldwell *et al.* (2006) compararon el comportamiento de parámetros hidrológicos y edáficos en el desierto de Mojave en California, en sitios conservados y en otros alterados por la práctica de ejercicios militares, encontraron que la infiltración,

densidad aparente y la resistencia a la penetración fueron significativamente diferentes en los sitios conservados y perturbados, también encontraron diferencias importantes en el comportamiento entre suelos jóvenes y maduros ante el mismo impacto.

Miguel de Paz *et al.* (2006) con la ayuda de un SIG calcularon los índices de la degradación física, química y biológica del suelo para la región de Valencia España, también elaboraron un mapa digital donde se localiza cada tipo de degradación con su respectivo índice.

5.2 Antecedentes del área de estudio

-Félix (1891) y Lenk (1891) estudian la geología de la región de Tehuacán y sus alrededores caracterizando las formaciones de los periodos Jurásico y Cretácico.

- Alencáster (1956) realiza exploraciones paleontológicas identificando y describiendo varias especies de pelecípodos y gasterópodos de San Juan Raya.

- Calderón-García (1956) estudió la estratigrafía y tectónica del sur de Puebla y propone la creación del grupo geológico Puebla constituido por las formaciones Zapotitlán, Miahuatepec y San Juan Raya donde encuentra gruesos bancos de calizas con monopleuros y perineos.

- Aguilera (1970) estudió los suelos de lomeríos en los alrededores de Tehuacán, encontrando suelos calcáreos, salino-calcáreos, yesosos y calcáreo-yesosos. Señala que la distribución de las cactáceas varía con las propiedades de los suelos.

- Fuentes *et al.* (1971) efectuaron un análisis geográfico de la zona de San Juan Raya.

- Barceló (1978) evaluó la estratigrafía y petrografía detallada de San Juan Raya.

- Buitrón y Barceló (1980) describieron la diversidad de nerineidos del Cretácico Inferior de la región de San Juan Raya.

- En 1979 el Instituto Nacional de Investigaciones Sobre Recursos Bióticos (INIREB), inició la clasificación del estudio de la vegetación de la región de Tehuacán-Cuicatlán por métodos cuantitativos y estadísticos. De este trabajo derivó el diseño y la creación del jardín botánico y vivero de cactáceas "Dra. Helia Bravo" (INE-SEMARNAP 1997).

- Villaseñor *et al.* (1991) realizaron un estudio fitogeográfico del valle de Tehuacán-Cuicatlán.

- García (1991) analizó las unidades del paisaje en la cuenca del río Zapotitlán y la relación de la vegetación con dichas unidades, se correlacionó la influencia de los elementos del medio físico y la distribución de la vegetación de la cuenca.
- García (2000) realiza un levantamiento edafológico en las terrazas aluviales del río Zapotitlán, encontrando que los principales tipos de suelo son Regosoles y Fluvisoles hapli calcáricos. También identificó tres series de acuerdo a la variación textural de los horizontes superficiales.
- Valiente-Banuet y Ezcurra en (1991) investigaron la relación espacial entre las cactáceas y los arbustos nodrizas en el valle de Zapotitlán.
- Casas (1995) analizó las relaciones hombre-naturaleza en la región desde la perspectiva del aprovechamiento de los recursos naturales y su impacto sobre los mismos.
- La International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN), reconoce al valle de Tehucán-Cuicatlán como una área de alta concentración de endemismos (Dávila, 1997).
- Oliveros (2000) caracteriza la estructura de las comunidades vegetales en las terrazas fluviales del río Salado en el valle de Zapotitlán.
- Valiente-Banuet *et al.* (2000) presentan el trabajo denominado la vegetación del valle de Tehuacán, donde proponen un sistema para la identificación y denominación de los tipos de vegetación y asociaciones vegetales del valle de Tehuacán.
- Casas *et al.* (2001) evalúan la riqueza de los recursos vegetales, así como sus formas de uso y manejo en la reserva de la biosfera Tehuacán-Cuicatlán.
- McAuliffe *et al.* (2001) realizan una investigación sobre geomorfología y paleosuelos para tratar de encontrar las causas del colapso de la agricultura pre-colombina en el valle de Tehuacán, encontraron que un factor determinante en este suceso fue la erosión del suelo provocada por las prácticas agrícolas en laderas. En este mismo trabajo dataron con Carbono 14 la formación de terrazas fluviales del área de Metzontla, Puebla, encontrando que los primeros rellenos aluviales se formaron durante el Pleistoceno tardío y a principios del Holoceno hace 9170 ± 80 años, cuando el clima paso de ser seco y frío a uno más cálido y húmedo.
- Ochoa (2001) hace un trabajo sobre geomorfología, clima y su relación con la vegetación en el valle de Tehuacán-Cuicatlán. Identifica la unidades mayores del relieve, también traza varios perfiles geomorfológicos y calcula datos morfométricos y climáticos.
- Dávila *et al.* (2002) publica el artículo que lleva por nombre diversidad biológica en el valle de Tehuacán-Cuicatlán, México. Los autores señalan que la flora de este valle

representa entre el 10 y 11.4% de la flora nacional, también indican que hay 365 especies endémicas y que 185 especies de plantas son utilizadas por los pobladores.

- Téllez y Dávila (2003) examinan los efectos del cambio climático sobre los futuros patrones de distribución de 20 especies de *Cactaceae* en la reserva de la biosfera de Tehuacán-Cuicatlán.

- Morín (2003) realiza un inventario florístico de las terrazas aluviales de Zapotitlán, Puebla.

- López *et al.* (2003) realizan un análisis integral de los componentes físico-bióticos de la cuenca de Zapotitlán, utilizando varias toposecuencias donde se establecen las relaciones existentes entre la litología, geomorfología, suelos y el uso del suelo.

VI ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se realizó en dos terrazas fluviales del río Zapotitlán, situadas en la cuenca del mismo nombre. Para tener una idea más clara acerca del origen, geomorfológica y propiedades de los suelos de las terrazas fluviales, primero se hará referencia a las características generales de toda la cuenca y después se particularizará en la descripción de las terrazas.

6.1 Descripción de la cuenca de Zapotitlán

La cuenca de Zapotitlán se localiza en la parte SE del estado de Puebla (Fig. 2) entre los paralelos $18^{\circ} 07' 18''$ y $18^{\circ} 26' 00''$ de latitud N y los meridianos $97^{\circ} 19' 24''$ y $97^{\circ} 39' 06''$ de longitud W. Limita al Norte con los Cerros Chacaltecas, C. Mar Rubio, C. Pajarito, C. Tarántula, C. La Colmena, C. Volcancillo y la Ventas, Hacia el Sur el límite principal es la Sierra de Acatepec. Por el Este el límite lo forma la Sierra de Miahuatepec y en el Oeste se establece como límite la cota de los 1800 msnm que pasa por los Cerros Yolotepec y C. Xentile (INEGI 1984). El municipio de Zapotitlán está comunicado por la carretera Federal No. 125 que va de Tehuacán a Huahuapan de León, Oaxaca, pasando por los poblados de Sta. María Cuapan, San Antonio Texcala, Zapotitlán de las Salinas, Acatepec y Santiago Chazumba, entre otros (Sec. de Gob. Pue. 1988).

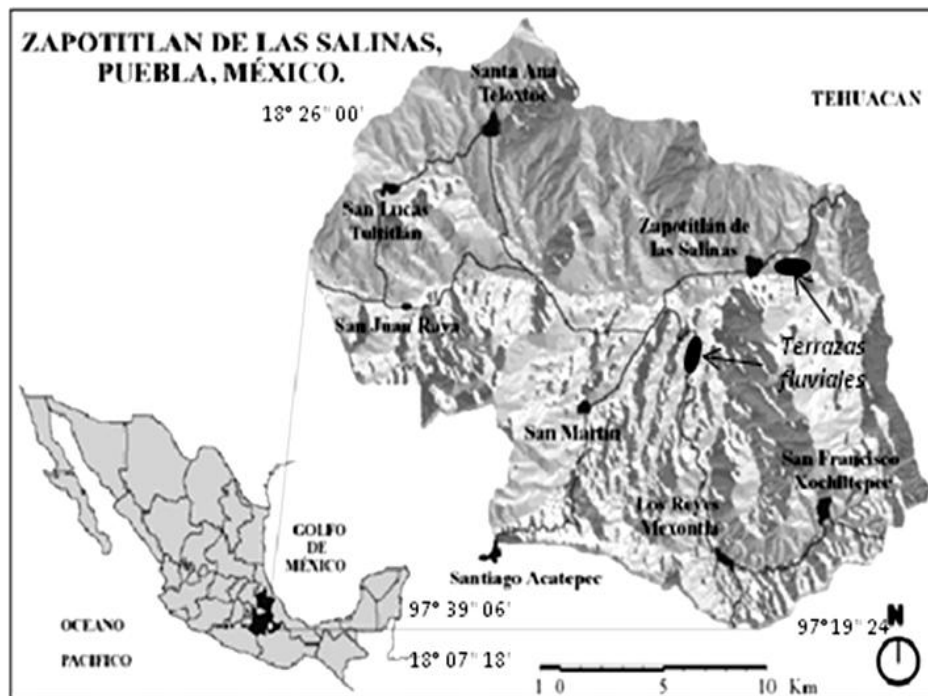


Figura.2. Ubicación de la cuenca de Zapotitlán y de las terrazas fluviales
(Cortesía de Montoya, 2003)

El clima que prevalece está determinado en gran parte por la sierra de Zongólica (Sierra Madre Oriental), que detiene los vientos húmedos que vienen del Golfo de México, formando una zona de escasa precipitación en el valle de Tehuacán (Valiente-Banuet 1991). El tipo climático que le corresponde de acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1973) es BSo hw" (i)g que es un clima seco, semi-cálido con una temperatura media anual de 21.0°C, con una oscilación térmica entre los 5° y 7°C, el mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano; el régimen de lluvias es de verano; existe una sequía en la mitad del periodo de lluvias (canícula). La precipitación total anual promedio es de 420 mm (Fig. 3).

Según la regionalización hidrológica realizada por la entonces SRH (Secretaría de Recursos Hidráulicos), la zona pertenece en su mayor parte a la Región Hidrológica (RH28) de la cuenca alta del río Papaloapan y solo el extremo SW drena hacia la cuenca del Balsas. Dentro de la totalidad de las subcuencas que conforman la gran cuenca del río Papaloapan, la cuenca de Zapotitlán se inserta en la Subcuenca Fluvial del río Salado. El río Zapotitlán se origina en el escarpe de Santa Ana Teloxtoc y en la sierra del mismo nombre, ubicados hacia el SW de la ciudad de Tehuacán Puebla (Fig. 2). El río Zapotitlán corre en dirección W-E y en su salida se conecta con el río Tehuacán a la altura del poblado de San Gabriel Chilac formando así el río Salado, afluente secundario del río Papaloapan (Sec. de Gob. Pue. 1988).

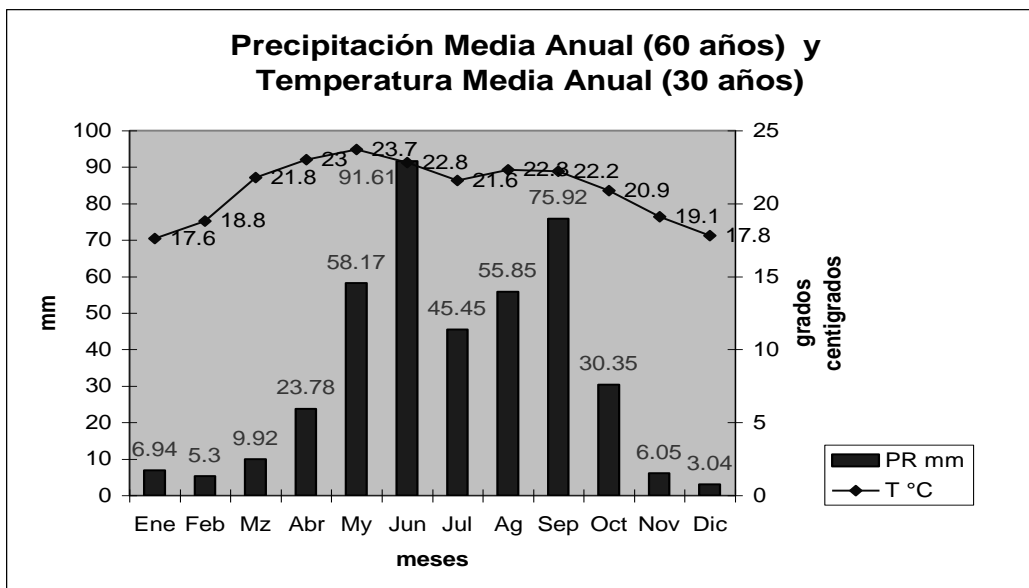


Figura 3. Climograma de la estación Zapotitlán Salinas.
(Tomado de Néri 2000)

Los suelos de la cuenca del río Zapotitlán presentan una morfología poco diferenciada del material parental, son calcáreos y de profundidad variable para todo el valle. López *et al.* (2003), identificaron cuatro grupos de suelo: Leptosoles, Regosoles, Fluvisoles y Calcisoles (Sistema WRB- FAO 1998). Los Leptosoles y

Regosoles son los que más extensión cubren. Los primeros se localizan en geoformas elevadas o piedemontes con litología muy resistente al intemperismo. Los Regosoles se encuentran principalmente hacia el noroeste en paisajes abruptos con litología blanda sobre relieves accidentados con fuerte abarrancamiento y denudación. Rumbo al oeste, se distribuye una pequeña área de suelos maduros identificados como Calcisoles que muestran el desarrollo de horizontes cálcicos, se localizan en lomeríos y planicies. En las partes de menor altitud sobre geoformas de terrazas de río, se encuentran suelos de tipo Fluvisol y Regosol formados por el depósito de material transportado por las corrientes superficiales.

Las principales actividades de la cuenca de Zapotitlán son la minería y las artesanías de ónix, la extracción de sal y el comercio. La agricultura ocupa un lugar secundario, como consecuencia de la baja aptitud territorial, limitada por la escasa precipitación y por la topografía imperante. Por otra parte, los suelos son someros y pedregosos, por lo que sólo se presenta una agricultura de subsistencia, ubicada principalmente en las terrazas aluviales donde las condiciones son menos restrictivas.

6.2 Descripción las terrazas fluviales (área de estudio).

El Sistema de Terrazas estudiado se localiza entre las coordenadas $18^{\circ} 19'08''$ y $18^{\circ} 19'45''$ de latitud norte y los $97^{\circ} 27'00''$ y $97^{\circ} 27'40''$ de longitud oeste, se encuentran sobre las márgenes o riveras del río Zapotitlán, un río intermitente que corre en dirección oeste-este por la porción meridional de la cuenca (Fig. 4). El río Zapotitlán tiene una longitud de 32.25 km, presenta una altitud máxima de 1600 m.s.n.m. hacia el oeste y una mínima de 1430 m.s.n.m en la desembocadura, la pendiente promedio es de un grado por lo que su condición es casi llana.

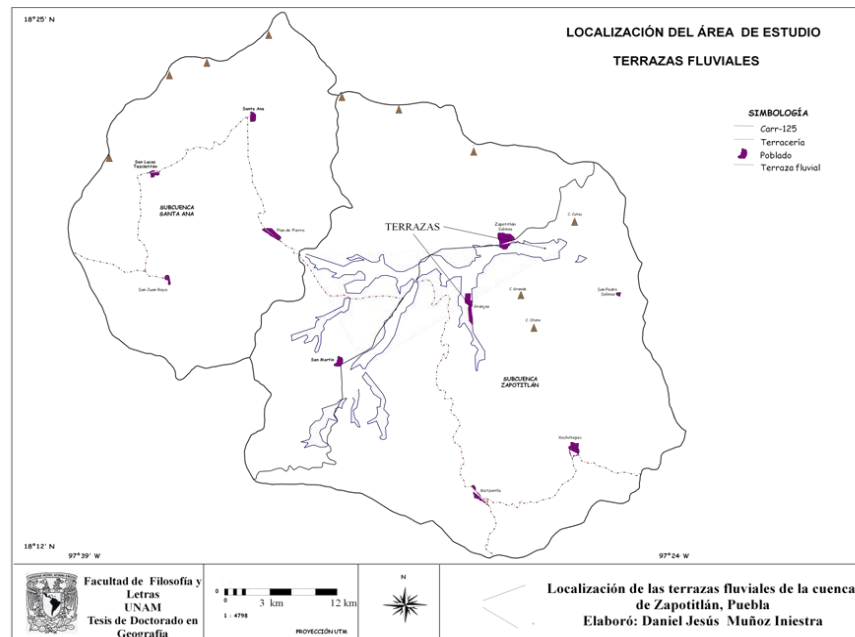


Figura 4. Localización de las terrazas fluviales en la cuenca de Zapotitlán, Puebla.

Las terrazas fluviales estudiadas son de tipo acumulativo erosivo, son depósitos fluviales acumulados en un ambiente de alta energía en eventos esporádicos y violentos, lo cual se puede constatar en la estructura y composición de los rellenos aluviales (o lentes granulométricos). En la actualidad estos depósitos están en proceso de degradación, por lo que la antigua planicie de inundación ha sido reducida y disectada a través de procesos cíclicos formando terrazas erosivas con diferentes niveles de alteración y grado de fragmentación (Fig. 5). Esto ha determinado la formación de un patrón recurrente de fragmentos o islas que presentan distintas condiciones de degradación y/o conservación, que se manifiestan en superficies sin vegetación y con procesos degradativos, que se alternan con áreas con suelos conservados por la vegetación natural; así mismo existen sitios que presentan estados de deterioro intermedios (Fig. 5). Por lo que se puede observar existe una tendencia hacia la destrucción de las terrazas y la formación de una nueva planicie de inundación como parte del proceso de ajuste del cauce fluvial a las actuales condiciones ambientales.



Figura 5. Situación actual de una de las terrazas. Nótese el grado de erosión y fragmentación que presenta.

Las terrazas fluviales no forman un sistema continuo a lo largo del río ya que en algunos lugares no hubo condiciones para su formación, el espesor de los depósitos puede llegar hasta 20 m. Presentan varios mantos aluviales pudiéndose observar estratificaciones de arcilla y limo, arena muy fina, cantos rodados y gravas. Las terrazas fluviales se formaron a finales del Pleistoceno y principios del Holoceno bajo condiciones climáticas más húmedas, donde de acuerdo a Buitrón

(1970) y Barceló (1978) se dieron fenómenos extraordinarios de erosión y depositación, que permitieron que el río transportara grandes cargas de sedimentos que cubrieron en ese entonces el estrecho valle, para ser posteriormente erosionados y dar lugar a las terrazas erosivas. De acuerdo a los estudios de datación hechos en terrazas del valle de Zapotitlán por McAuliffe *et al.* (2001), se sabe que los primeros rellenos aluviales se formaron durante el Pleistoceno tardío hace 9170 ± 80 años, cuando el clima pasó de ser seco y frío a uno más cálido y húmedo (Fig.6).

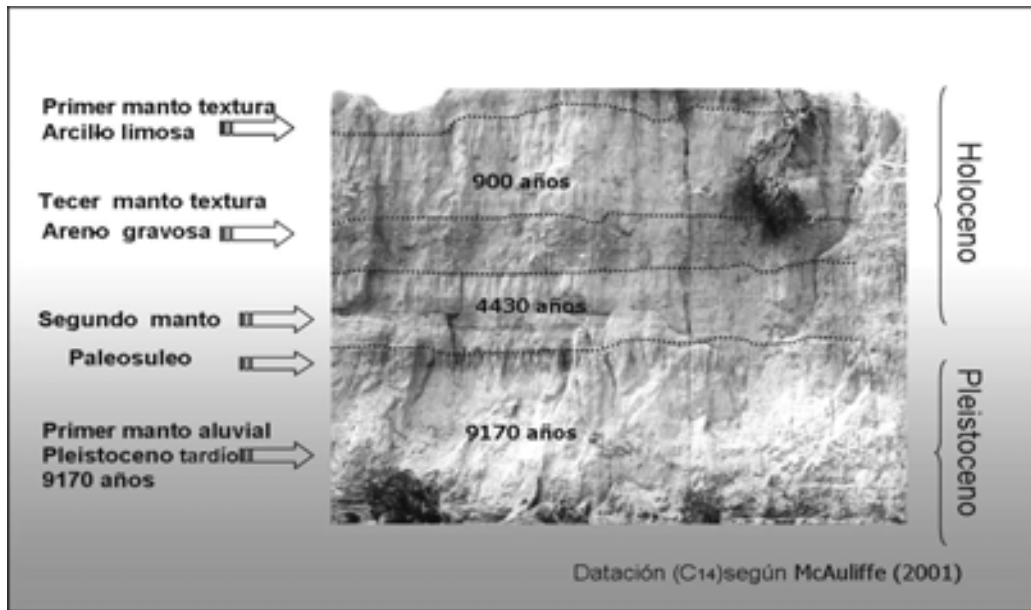


Figura 6. Secuencia estratigráfica una de una terraza fluvial muy cercana a la zona de estudio.

Los suelos son profundos de tipo de Fluvisol, según García (2000) se presentan dos series, esto de acuerdo a la composición mineralógica y la secuencia granulométrica de los primeros horizontes. La primera serie es la Zapotitlán que se distribuye en la mayoría de las terrazas aluviales (porción centro y norte de la cuenca). Los suelos de esta serie se formaron de sedimentos fluviales ricos en carbonato de calcio, se distinguen por presentar color gris parduzco, texturas franco arcillo limosas y franco arcillosas, estructuras con agregación laminar masiva, dura y compacta, de reacción alcalina (pH de 8.0 a 8.5) y contenidos de materia orgánica que van de pobres a moderados. La otra serie la denomina Granjas, se distribuyen en el área de influencia del sistema montañoso Cerro Grande con suelos de color pardo o pardo amarillo, de textura franco arenosa, moderados contenidos de carbonatos, con importante presencia de minerales de hierro (hematita) estructura granular e individual en los primeros horizontes, el subsuelo es pedregoso y muy compacto.

VII METODOLOGÍA

7.1 Estudio descriptivo general

La investigación se inició con un reconocimiento de toda la cuenca de Zapotitlán Puebla, utilizando material cartográfico para trazar los límites y calcular la extensión del área, también se identificaron vías de comunicación, rasgos culturales y las poblaciones. El reconocimiento geomorfológico general se realizó, por la integración de los métodos de Tricart y Killian (1982) y Lugo (1986), utilizando las técnicas morfométricos tradicionales. Se empezó con un análisis bibliográfico de la geología del sitio para identificar las principales estructuras geológicas y litología superficial. Después, en un mapa topográfico escala 1: 50,000 (INEGI 1984) se realizó la carta hipsométrica con intervalos altitudinales de 100 y 200 m. Se calculó y trazó el mapa de pendientes por medio del cálculo de equidistancias de curvas de nivel y la relación con distancias equivalentes (Lugo 1986).

Con ayuda de la carta topográfica del INEGI esc: 1:50,000 y de fotografías aéreas b/n de escala 1: 20,000 del año de 1995, se delimitó y georreferenció el sistema de terrazas fluviales (Fig. 4), en esas mismas fotos se hizo una fotointerpretación para conocer el uso actual del suelo, delimitando las áreas con degradación extrema, los sitios más conservados y los lugares con distintos usos. En cada una de las terrazas se abrieron y describieron dos perfiles edáficos, se tomaron las muestras respectivas y se analizaron en el laboratorio, también se realizó un levantamiento florístico para comparar la flora de ambas terrazas.

7.2 Monitoreo de la dinámica edáfica

7.2.1 Delimitación y descripción del área de monitoreo

*Para el seguimiento o monitoreo de las propiedades del suelo bajo distintas condiciones de conservación y/o degradación se seleccionaron dos terrazas fluviales, una con suelo franco arenoso (Terraza **A**) y la otra con suelos de textura arcillo limosa (Terraza **D**). Las terrazas están separadas por una distancia lineal de aproximadamente 4.4 Km. (Fig. 7). En cada una de las terrazas se escogieron varios escenarios en donde el suelo presentaba diferentes condiciones de conservación, degradación o uso, ésto para tener un marco de referencia y comparación de las fluctuaciones de las propiedades físicas y químicas evaluadas bajo distintas condiciones (Cuadro 1).*

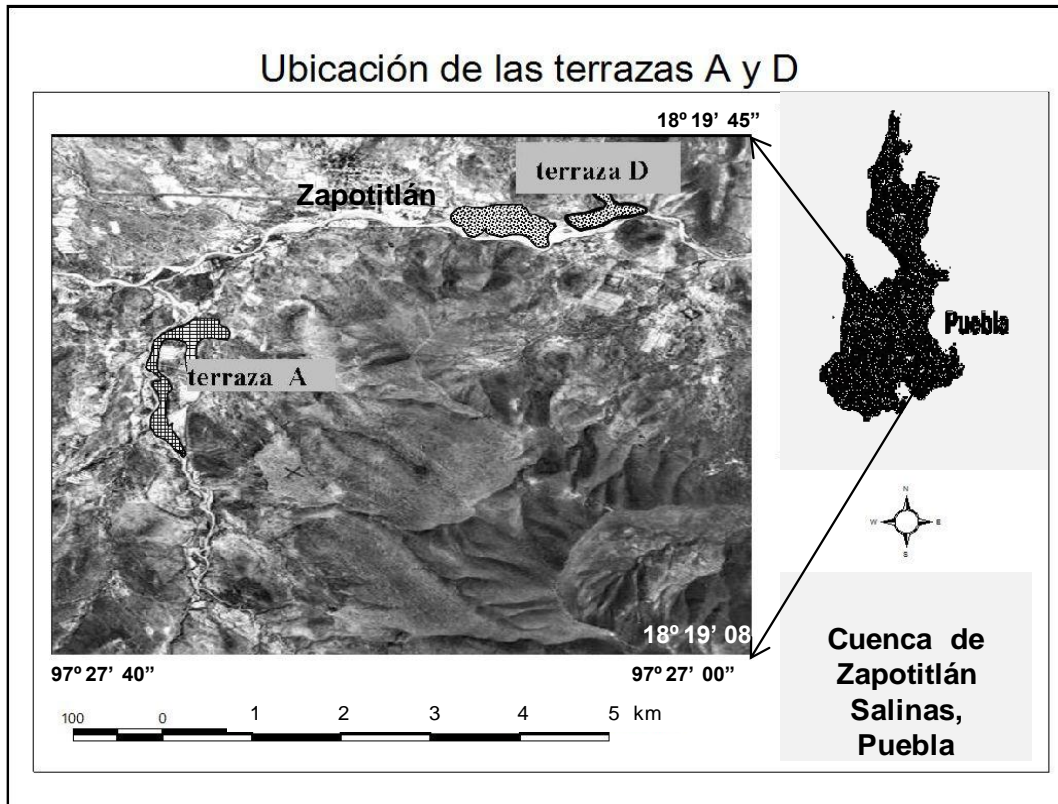


Figura 7. Ubicación de las dos terrazas en donde se realizó la investigación. Los suelos de estas terrazas presentan diferente morfología y distinta textura.

Cuadro 1. Diferentes condiciones que se presentan en las terrazas fluviales.

Sitios Conservados	Sitios Moderadamente Conservados	Sitios Deteriorados
<p>Sitios donde no hay evidencias claras de deterioro, los sistemas naturales muestran una estructura y funcionamiento completo. Presentan una geomorfología original con relieve llano; los materiales geológicos (sedimentos aluviales) aún conservan sus estructuras primarias con nula o poca alteración; el suelo presenta todos sus horizontes. La vegetación tiene una estructura fisonómica poco modificada, con una marcada estratificación vertical y mayor diversidad.</p>	<p>Sitios donde las condiciones originales se ven alteradas de forma parcial y donde al parecer, el proceso de deterioro no se ha intensificado a tal grado que afecte la estructura y dinámica del ecosistema. El relieve ha sido modificado por efecto del cambio del uso del suelo. La geomorfología muestra una mayor disección vertical en los materiales, se incrementa la formación de canales y cárcavas, se presenta deformación incipiente por fragmentación y reedeposición de sedimentos. Los suelos muestran alteración en los horizontes superficiales. La vegetación muestra algunos cambios en su composición original, incrementándose el número de especies herbáceas.</p>	<p>Sitios que presentan efectos muy evidentes de degradación, manifestada por una modificación y fragmentación del paisaje y pérdida de la mayor parte de la biota establecida a causa de procesos naturales de erosión hídrica y eólica. La geomorfología manifiesta procesos de colapsamiento, la fragmentación de las terrazas fluviales se encuentra en su máximo nivel, es evidente la formación de pináculos y pedestales creados por erosión, deslizamiento y derrumbes de grandes masas de sedimentos, formación de agrietamientos, fosas y depresiones. El suelo original ha perdido sus horizontes superficiales, la vegetación es dispersa y distribuida en "islas de fertilidad"</p>
		

7.2.1.1 Descripción de la terraza **D**

La terraza **D** se localiza en la porción media oriental de la cuenca teniendo como coordenada del punto central 18°19'33" Lat. N. y 97°27'17.4" Long. W, con una altitud absoluta de 1444 m. Con respecto al cauce, esta terraza tiene una altura de 17 m, el ancho medio es de 465 m y la superficie es aproximada de 20 ha, de las cuales el 10% presenta una fuerte desertificación, el 90 % de la superficie restante presenta una combinación de parches con suelo desnudo y sitios con vegetación de

matorral espinoso (mezquital) (Fig. 8 y 9). La porción desertificada muestra un relieve irregular disectado y muy fragmentado constituido por un conjunto de formaciones individuales (“Islas”) separadas unas de otras por barrancos. La erosión es muy severa, perdiéndose en muchos lugares el suelo, así mismo, el proceso de acumulación es activo en los fondos de las barrancos. Estas islas o fragmentos de terraza presentan toda una gama de condiciones en cuanto a la vegetación se refiere, quedando parches con vegetación natural más o menos conservada, otros más perturbados y otros tantos sin vegetación. El tipo de vegetación presente es un matorral espinoso de mezquite. En esta terraza se eligieron cuatro sitios con escenarios con suelo desnudo (sin vegetación) y con problemas de degradación, tres con suelo protegido por vegetación aparentemente en buenas condiciones de conservación de acuerdo a los criterios FAO (1984) y uno más con suelo de uso agrícola (Fig. 9). Tal y como se puede advertir en el cuadro 2 y la figura 8, los sitios con suelo protegido y aquellos con suelo desnudo estaban muy cerca uno del otro, separados por distancias muy cortas, ésto para tratar de garantizar que se trabajara en el mismo tipo de suelo. El suelo de la terraza **D** corresponde a un Fluvisol haplicalcárico de la serie Zapotitlán (García, 2000), es profundo y compacto. El horizonte superficial es de color pardo grisáceo en seco (10YR 5/2), con estructura laminar de baja estabilidad en los primeros 2 cm, después cambia a masiva y poliédrica subangular de tamaño medio y fino estable, la consistencia en seco es dura y friable en húmedo, con 24% de arena, 53 % de limo y 23 de arcilla (franco limosa), pH de 7.9 y 23 % de carbonatos.

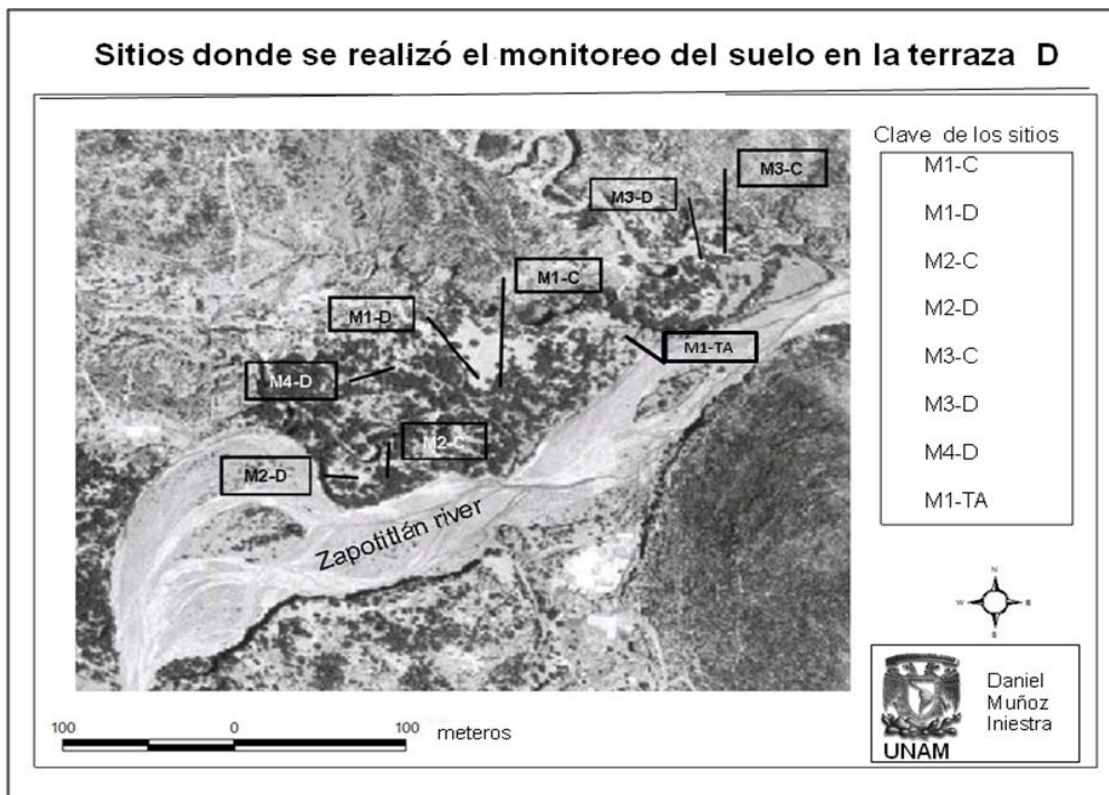


Figura 8. Sitios de la terraza **D** donde se realizó el monitoreo del suelo

Cuadro 2. Coordenadas de los sitios de monitoreo de la terraza D.

Sitios degradados (Suelo desnudo)	Coordenada	Sitios conservados (Suelo protegido)	Coordenadas
M1-D	Lat. N. 18°19'33" Long. W. 97°27'17.4" Altitud: 1446 m	M1-C	Lat. N. 18°19'29.5" Long. W. 97°27'16.2" Altitud: 1446 m
M2-D	Lat. N. 18°19'21.4" Long. W. 97°27'29" Altitud: 1444 m	M2-C	Lat. N. 18°19'22.4" Long. W. 97°27'28.6" Altitud: 1444 m
M3-D	Lat. N. 18°19'33.1" Long. W. 97°27'02" Altitud: 1443 m	M3-C	Lat. N. 18°19'32.2" Long. W. 97°27'08" Altitud: 1443 m
M4-D	Lat. N. 18°19'33.2" Long. W. 97°27'24.11" Altitud: 1445 m	M1-TA (Agrícola)	Lat. 18°19'23.88" Long W. 97°27'45.99" Altitud: 1444 m

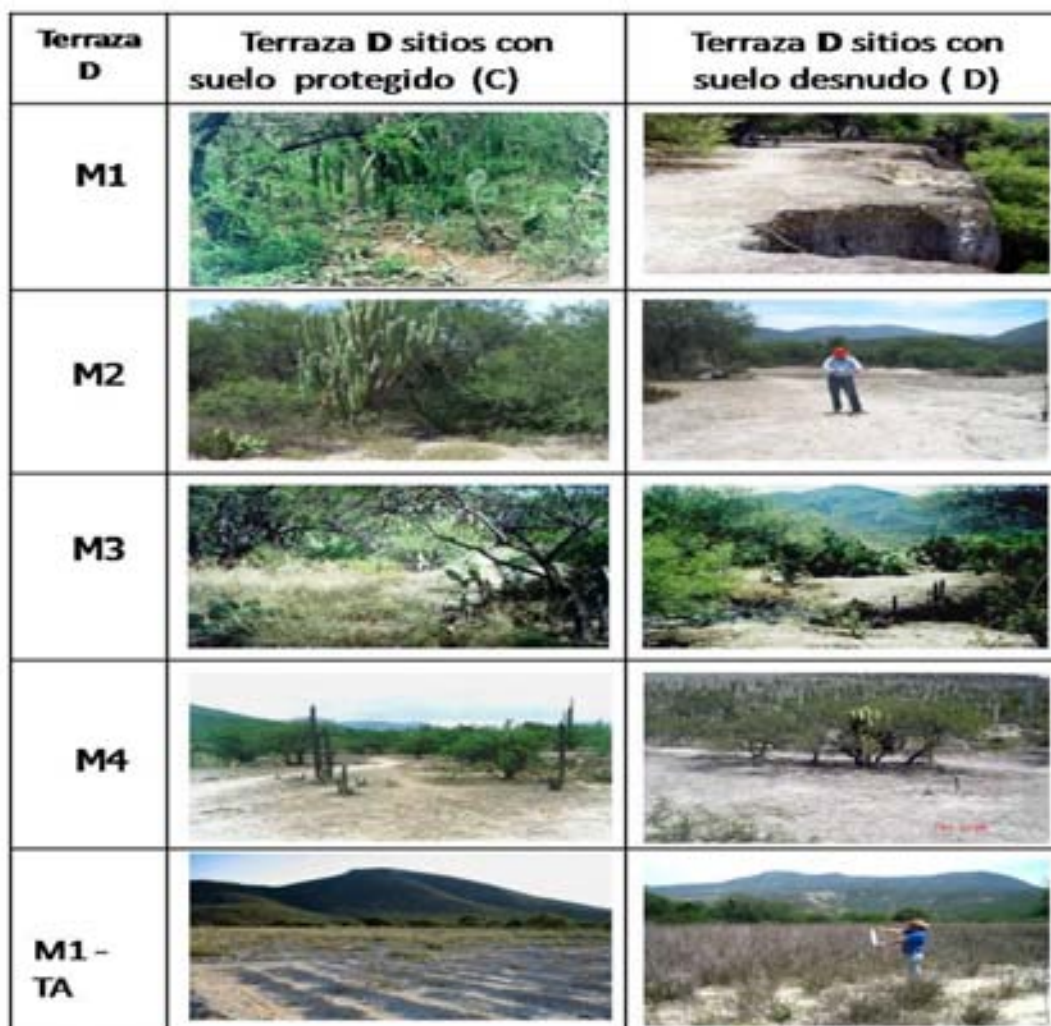


Figura 9. Fotografías donde se muestran los diferentes sitios de la terraza D

7.2.1.2 Descripción de la terraza **A**

Se localiza en la barranca Boquerón zona de asentamiento de granjas avícolas, tiene una superficie aproximada de 5 ha, una altitud absoluta de 1500 m y una altura con respecto al cauce de 5 m. La coordenada del punto central es 18°18'32.2 Lat. N y 97°29'08 Long. W (Fig. 10). La terraza **A** está constituida por una franja de terreno bien conservada, tiene una longitud aproximada de 500 m y un ancho de 95 m, con escasa fragmentación, mínima erosión, baja densidad de canales y/o cárcavas. Muchos de los canales son efímeros, los permanentes presentan valores bajos de profundidad de disección vertical. La vegetación en la mayor parte de la terraza está bien conservada, constituida por un matorral espinoso de mezquite con un estrato arbóreo de hasta 6 m de altura. El uso del suelo de la terraza **A** es muy variado, en general se trata de un mosaico de condiciones donde por fortuna la vegetación natural ocupa todavía una buena porción de la terraza, esta vegetación se encuentra interrumpida por la presencia de granjas avícolas, áreas con agricultura de temporal y terrenos agrícolas abandonados en proceso de sucesión ecológica, por lo que la proporción de suelo desnudo es baja en comparación con la terraza **D**.

El suelo es un Fluvisol esqueleti-calcárico, pertenece a la Serie Granjas es profundo, pedregoso y compacto con un horizonte superficial orgánico de 3 mm de espesor, constituido de hojarasca, ramas y vainas; debajo de esta capa subyace un horizonte mineral de color pardo, ligeramente compacto con estructura granular y poliédrica subangular fina pobremente desarrollada, con textura franco arenosa, consistencia suelta, ligeramente plástico y sin adhesividad. Las raíces de tamaño fino y mediano son frecuentes, escasos residuos orgánicos, frecuentes gravas y de reacción moderada a la presencia de carbonatos. El subsuelo es muy compacto, pedregoso, de color pardo pálido, compacto, escasa agregación, las partículas se comportan de manera individual, las raíces finas son escasas y frecuentes las de tamaño medio, la reacción a los carbonatos es ligera. Dado que la terraza **A** es más chica que la **D**, sólo se seleccionó un sitio con suelo desnudo, dos con suelo protegido por vegetación y uno con suelo agrícola (Cuadro 3 y figuras 10 y 11).

Cuadro 3. Coordenadas de los sitios de monitoreo de la terraza **A**.

Sitios degradados (suelo protegido)	Coordenada	Sitios conservados (suelo desnudo)	Coordenada
M5-C	Lat. N. 18°18 '33.58" Long. W. 97°29'19.05" Altitud: 1500 m	M5-D	Lat. N. 18°18 '36.46" Long. W. 97°29'15.20" Altitud: 1500 m
M6-C	Lat. N. 18°17 '45.98" Long. W. 97°29'23.02" Altitud: 1501 m		
M2-TA	Lat. N. 18°18' 55.92" Long. W. 97°29'03.89" Altitud: 1498 m		

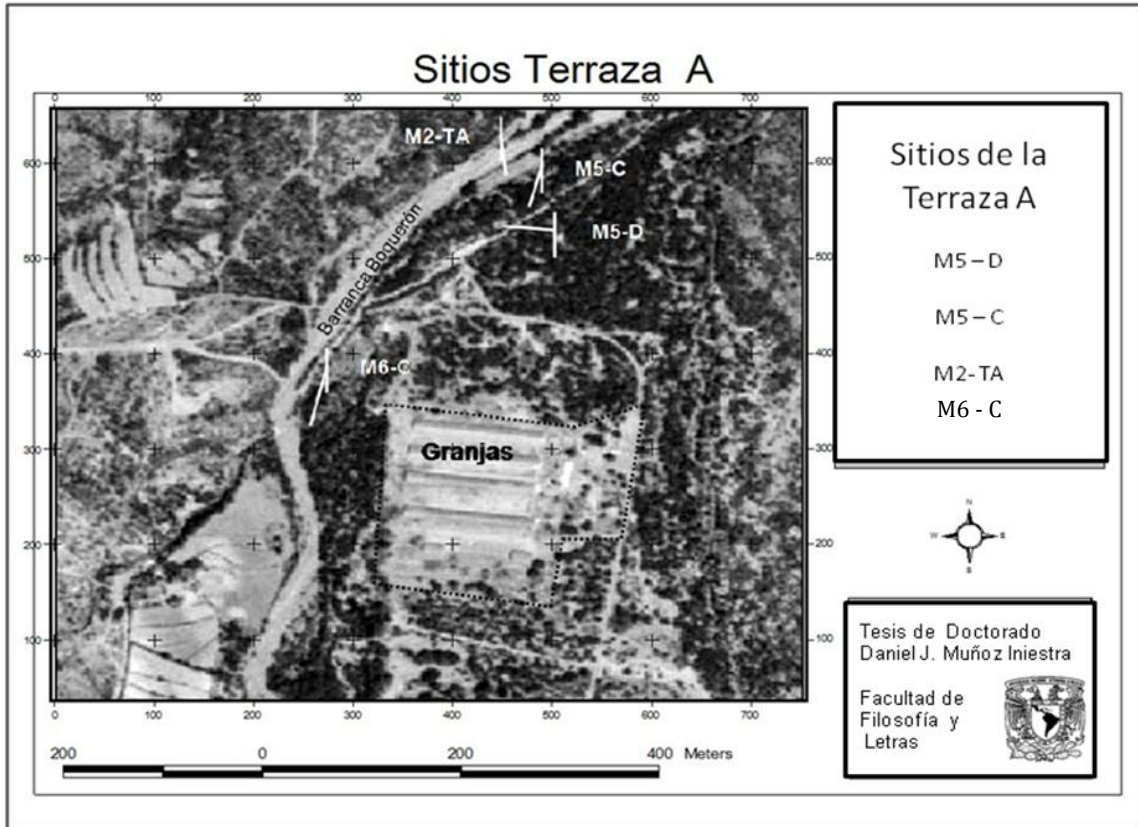


Figura 10. Localización de los sitios de monitoreo del suelo en la terraza **A**





Clave del sitio	Terraza A sitios con suelo protegido (C)	Clave del sitio	Terraza A sitios con suelo desnudo (D) Y agrícola (TA)
M5-C		M5-D	
M6		M2-TA	

Figura 11. Panorámicas de los diferentes sitios monitoreados en la terraza **A**

7.2.2 Trabajo de campo y laboratorio

Cada uno de los sitios de ambas terrazas fue visitado tres veces al año (marzo, agosto y noviembre) durante tres años consecutivos (2001-2004). El muestreo se realizó colectando muestras compuestas de suelo superficial (0 - 20 cm), en cada sitio se levantaron cuatro submuestras mismas que fueron mezcladas y homogeneizadas para formar una sola (SEMARNAT NOM-021-RECNAT-2000a). Las muestras siempre fueron colectadas de la misma manera, levantando siempre el mismo volumen de suelo. Las muestras compuestas se depositaron en bolsas de polietileno etiquetadas para ser transportadas al laboratorio donde fueron analizadas. Las propiedades evaluadas son las que se presentan en el cuadro 4. Algunas propiedades como la densidad aparente, infiltración y tensión de humedad fueron evaluadas en el campo.

Cuadro 4. Propiedades que se evaluaron y probaron como indicadores de la degradación del suelo

Parámetro	Técnica analítica.
Color	Cuadros de color de Munsell.
Densidad aparente	Con muestra no alterada tomada con cilindro metálico en campo.
Densidad real	Método del picnómetro
Porosidad total	Cálculo de las porosidades.
Textura (Arena, limo arcilla)	Método de Bouyoucos (1963).
Materia orgánica	Método de Walkley-Black (1947).
pH	Con un potenciómetro y con una relación suelo-agua de 1: 2.5.
C.I.C.T.	Extrayendo con acetato de amonio pH
Calcio intercambiable	Método desarrollado por Cheng y Bray (1951),
Potasio intercambiable:	Por flamometría
Carbonatos	Método gasométrico desarrollado por Marton y Newson, 1953
Fósforo soluble	Extrayendo con ácido cítrico
Nitrógeno total	Método Kjeldahl de Bremmer & Mulvaney (1982)
Conductividad eléctrica	Con el puente de conductividad
Infiltración	Por el método del infiltrómetro de doble anillo
Tensión de humedad	Con tensiometro de humedad de campo marca ELE
Compactación	Con penetrometro de resorte
Capacidad de campo	Por el método gravimétrico

C.I.C.T = capacidad de intercambio catiónico total.

De este modo se conformó una investigación con 18 variables de respuesta contra tres factores: a) Tipos de suelo (dos suelos), b) Condición de cobertura del suelo (tres coberturas) y c) Tiempo de seguimiento (4 años).

7.2.3 Análisis de datos

Por último se realizó el seguimiento del comportamiento de los indicadores, con la información obtenida se elaboró una base de datos, los cuales se analizaron y se interpretaron con la ayuda de pruebas estadísticas: análisis de varianza multivariado (manova), análisis de componentes principales y análisis de clasificación.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Estudio geomorfológico general del la cuenca de Zapotitlán Salinas, Puebla.

Tal y como se menciona en capítulos anteriores, para poder entender más acerca de los procesos de degradación que ocurren en las terrazas fluviales, fue necesario hacer un reconocimiento general del contexto físico donde se encuentran. Por esta razón se realizó un estudio geomorfológico de toda la cuenca y conocer más acerca del funcionamiento de la misma y así entender mejor los procesos que ocurren en las terrazas fluviales.

8.1.1 Geomorfología de la cuenca

La cuenca de Zapotitlán tiene una superficie de 39,600 ha, con una variación altitudinal que va de los 1420 a los 2600 metros sobre el nivel del mar (Fig. 12) presenta la cabecera hacia el noroeste y la salida rumbo al este. Por su morfología reúne las características de un valle intermontano con periferia más o menos cuadrada, con una inclinación en el sentido W-E. Está rodeada por un conjunto de elevaciones mayores, en su mayor parte de origen endógeno, tectónico formadas de plegamientos de calizas marinas, lutitas y areniscas, la mayoría de estas elevaciones muestra modelado erosivo. Las formas de las laderas dependen en gran medida del tipo de estructura, litología y grado de inclinación; sin embargo, en su gran mayoría son de tipo denudativas con formas convexas y rectas. Aproximadamente $\frac{3}{4}$ de la cuenca presenta pendientes mayores al 10 % (Fig. 13). Las formas de menor altura y menos inclinadas por lo regular están asociadas a estructuras plegadas con litologías poco resistentes al intemperismo; es muy notorio las diferencias del comportamiento de las distintas litologías ante la meteorización. No obstante de que las formas puedan tener la misma edad, las estructuras con lutitas se rebajan a una tasa más rápida que las formadas por calizas. De hecho el aspecto actual que tiene la cuenca se debe principalmente al intemperismo y erosión diferencial de las distintas litologías que forman la cuenca.

La cuenca se encuentra subdividida hacia el oeste por un conjunto de cuevas de rocas calizas que la divide de manera natural en una subcuenca alta de 12,800 ha y otra baja de 26,800 ha, ambas comunicadas en su porción central por una garganta por donde pasa el río Zapotitlán. El fondo de la planicie es atravesado por el río Zapotitlán, que se extiende en el sentido Oeste-Este, la pendiente del cauce es de tan sólo el 1%, casi llana; por lo tanto, se puede decir que la velocidad del cauce es lento; sin embargo, si se considera que durante su trayecto recibe los tributarios, la velocidad de las corrientes en tiempo de lluvias torrenciales puede aumentar de manera considerable. Sobre las márgenes del río aparecen un sistema de terrazas fluviales, que por su morfología y las características de sus suelos son funcionalmente inactivas, encontrándose en etapa de retroceso, estas terrazas presentan superficie llana con suelos profundos, es precisamente en estas terrazas donde se realizó la presente investigación.

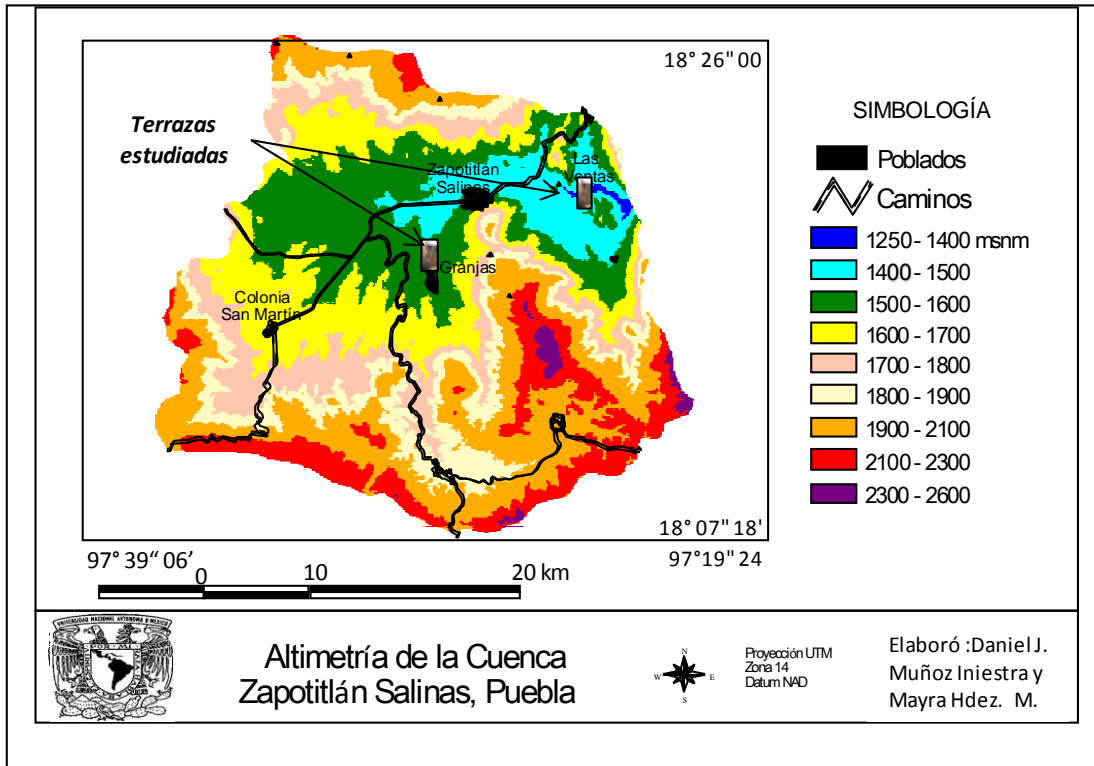


Figura 12. Mapa hipsométrico de la cuenca de Zapotitlán, Puebla.

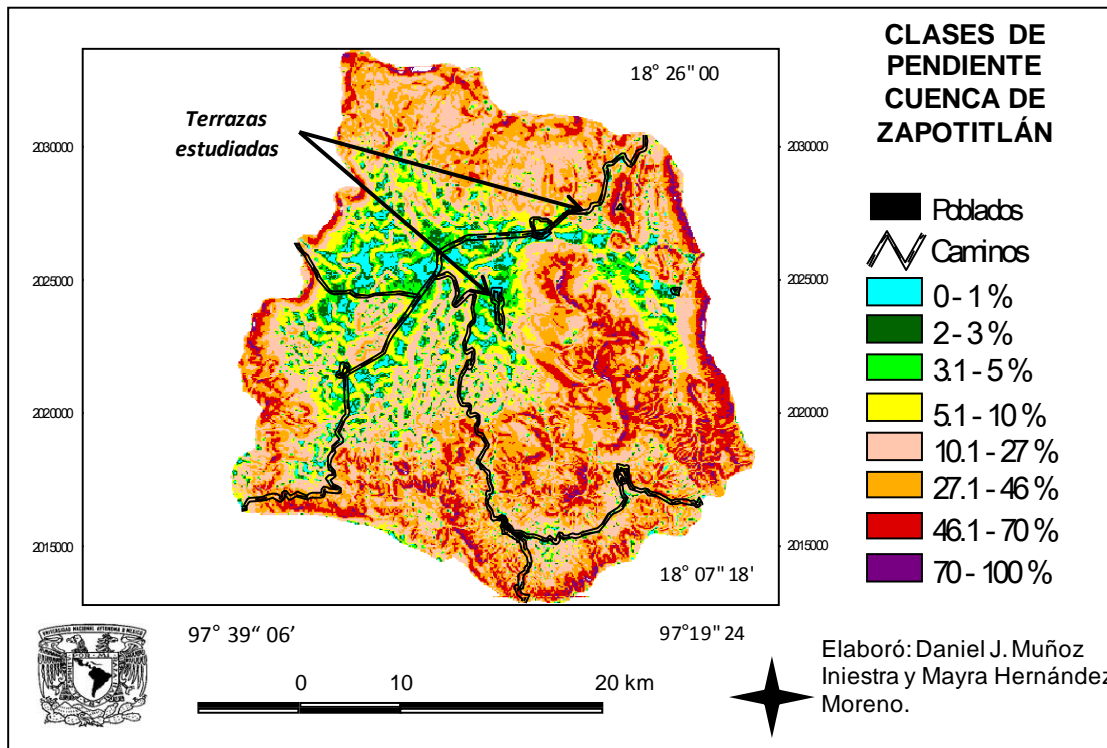


Figura 13. Mapa de variación de la pendiente en la cuenca de Zapotitlán.

El relieve de la cuenca de Zapotitlán es complejo y muy heterogéneo, esto se ve reflejado en la variación altitudinal, en el comportamiento de la pendiente (Figuras 12 y 13); así como en la gran variedad de formas que se presentan producto de la acción de procesos tectónicos, tecto-volcánicos y morfodinámicos (erosión-denudación). Las principales formas del relieve de la cuenca son elevaciones, piedemontes, planicies, elevaciones menores y terrazas fluviales (Fig.14). Las elevaciones son de origen tectónico con estructuras plegadas y con modelado erosivo, que definen formas como: lomas, cerros y sierras, de cimas redondeadas, cuestras y laderas convexas. En la base de estas elevaciones se encuentran piedemontes denudativos y acumulativos. Las planicies son superficies rebajadas, cuyo aplanamiento fue ocasionado por erosión diferencial que desgastó irregularmente materiales de distinta dureza, las terrazas son las principales formas de acumulación.

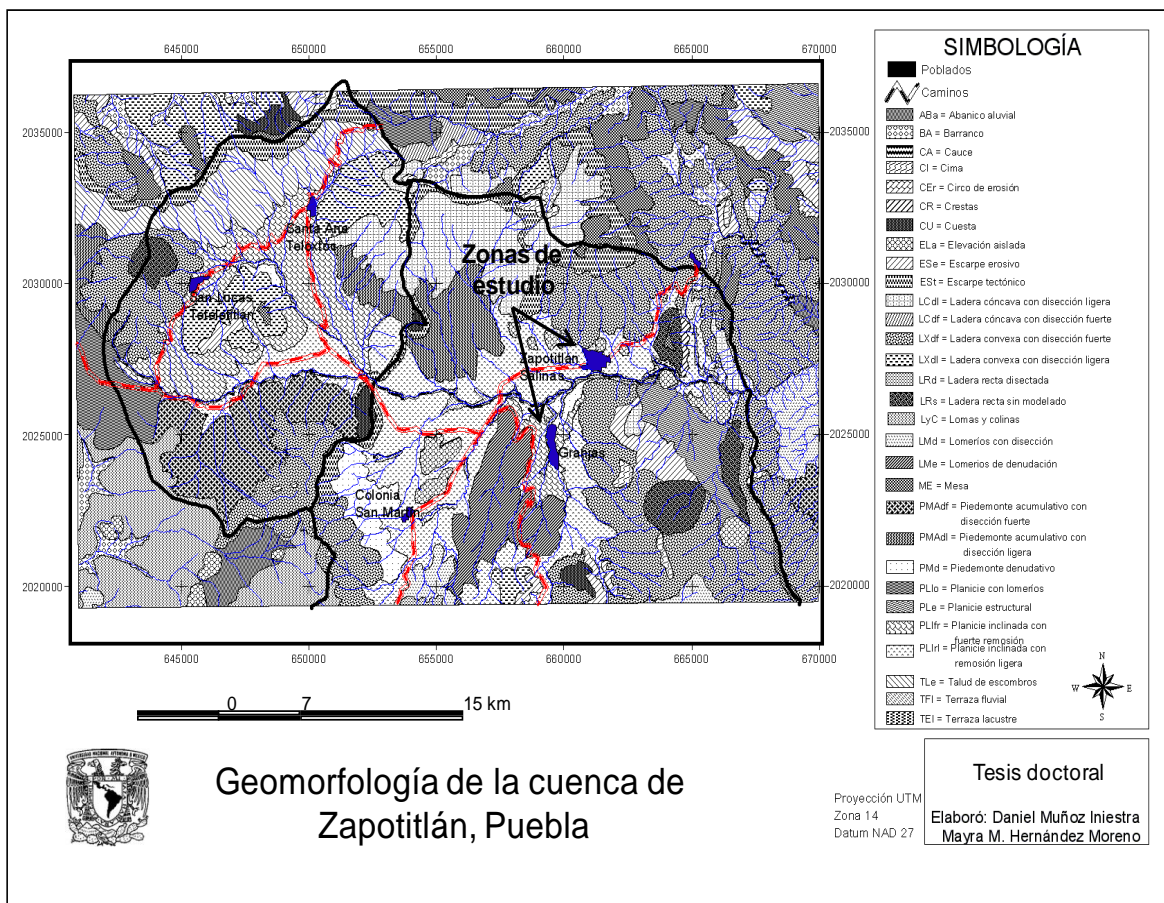


Figura 14. Mapa geomorfológico de la cuenca de Zapotitlán, Puebla y posición de las terrazas fluviales, objeto de estudio del presente trabajo.

8.1.2 Análisis de las formas mayores del relieve de la cuenca

Considerando el origen, estructura y patrón geomorfológico, se delimitaron las siguientes sistemas o formas mayores del relieve: Sierra de Zapotitlán, Sierra de Miahuatepec, Sierra Matzitzí, Sistema Cerro Grande, Dique Agua de Burro, Sistema Loma larga, Sistema Cerro la Hierba y Planicie de Zapotitlán (Fig. 15), mismas que se describen en los cuadros 5 y 6 donde se muestran los datos morfométricos obtenidos de las principales formas del relieve identificadas. Las terrazas que se estudiaron en este trabajo forman parte de la planicie de Zapotitlán (Fig. 16).

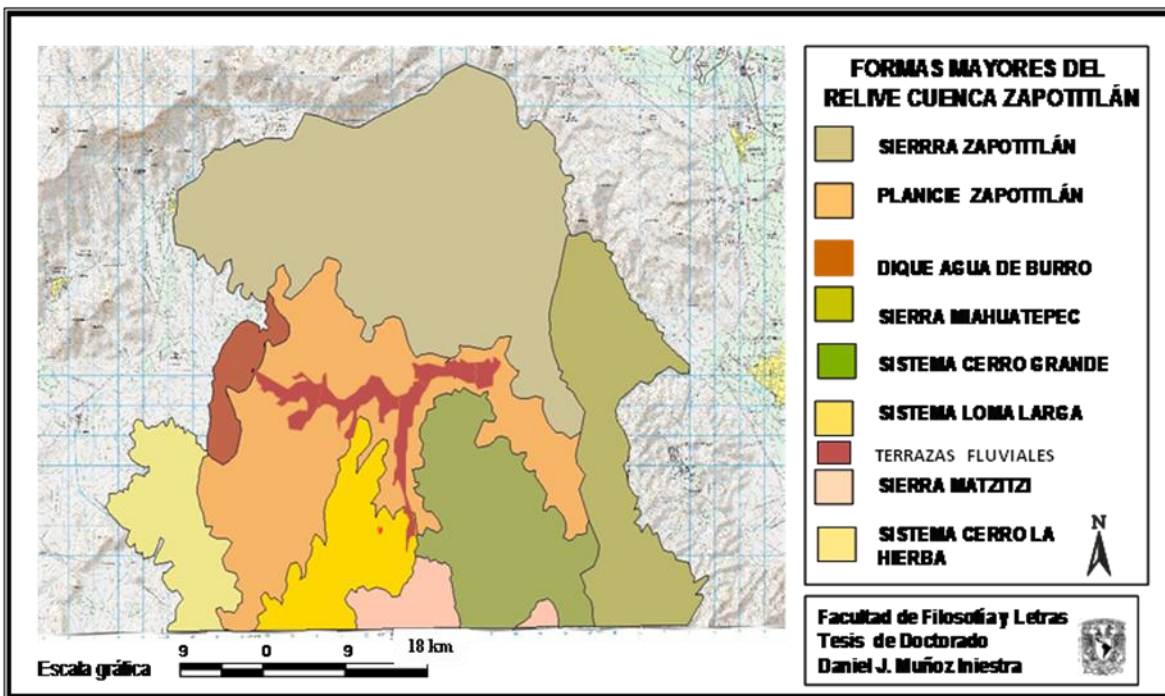


Figura 15. Principales formas mayores de la cuenca de Zapotitlán. Las terrazas fluviales son formas menores que se encuentran dentro de la planicie de Zapotitlán.

Cuadro 5. Atributos morfológicos de las formas mayores del relieve de la cuenca de Zapotitlán.

PARÁMETROS Morfológicos	Sierra Zapotitlán	Sierra Miahuatepec	Sistema Cerro Grande	Sierra Matzitzí
Dimensiones eje mayor y menor	14.388 km 8.550 km	14,725 km 4700 km	9,110 km 4,090 km	5,248 3,225
Variación altimétrica m.s.n.m.	1600-2600	1500 – 1980	1500 - 2440	1640 - 2140
Altitud absoluta	1000 m	480 m	940	500
Orientación	NE -SW	NNW - SSE	NNO- SSE	S - N
Simetría de los interfluvios.	Asimétrico	Asimétrico	Asimétrico	Simétricos
Posición del plano (horizontal o inclinado)	Inclinado hacia el Este	Inclinado hacia el Norte	Inclinado hacia el Norte	Inclinado hacia el Norte
Perfil de las vertientes (recto, escalonado, convexo, cóncavo, etc)	N-S convexo S-N convexo E-W Escalona	E-W convexo W-E Recto	E-W Convexo W-E Recto	Convexo
Tipo de parteaguas principal (rectilíneo, quebrado, irregular)	Quebrado	Rectilíneo	Curvilíneo	Irregular
Configuración de la red fluvial	Dendrítica Sur Dendrítica y Paralela al Norte	Paralela al W Sub-paralela E	Dendrítica	Paralelo
Ordenes de las corrientes	Tercer orden	Segundo orden	Segundo orden	Segundo orden
Densidad de la red fluvial km/km ²	1.01 a 1.90	2.06 a 3.30	1.71 a 2.90	1.01 a 1.90
Profundidad de disección vertical	40 a 240m	80 a 200m	20 a 120 m	20 - 360
Estructura geológica	Plegamientos	Plegamientos	Plegamientos con buzamiento NO - SE	Plegamientos
Formación Geológica	Formación Zapotitlán Cretácico inferior	Formación Miahuatepec Cretácico superior	Formación Mapache	Formación Matzitzí Pensilvánico
Litología	Lutitas calizas y areniscas	Calizas	Calizas Metamórficas y areniscas	Calizas y conglomerados
Denudación	Moderada en calizas y fuerte en lutitas	Moderada	Ligera	Moderada
Erosión	Moderada y muy fuerte en la vertiente E	Moderada en Vert. W y muy fuerte en Vertiente E	Moderada	Moderada

Cuadro 6. Continuación de los atributos morfológicos de las formas mayores del relieve de la cuenca de Zapotitlán. (Las terrazas objeto de estudio de la presente investigación se encuentran dentro de la planicie de Zapotitlán)

PARÁMETROS Morfológicos	Sistema Cerro la Hierba	Dique Agua de Burro	Sistema Loma Larga	Planicie de Zapotitlán
Dimensiones eje mayor y menor	7.169 km 3.250 km	8,200 km 4,500	7,610 3,555	-----
Variación altimétrica m.s.n.m.	1800-2260	1700 - 2300	1540 - 1780	De 1700 a 1380
Altitud absoluta	460 m	220 m	240 m	-----
Orientación	NE -SW	N - S	SW - NE	SW - NE
Simetría de los interfluvios.	Simétrico	Asimétrico	Simétrico	320 m
Posición del plano (horizontal o inclinado)	Horizontal	Horizontal	Inclinado hacia el NE	Inclinado hacia el Este
Perfil de las vertientes (recto, escalonado, convexo, cóncavo, etc	Cóncavo y convexo	E-W Recto W-E Convexo	Escalonado	-----
Tipo de parteaguas principal (rectilíneo, quebrado, irregular)	Curvilíneo	Rectilíneo	Escalonado	-----
Configuración de la red fluvial	Paralela y Dendrítica	Paralela	Paralela y plumiforme	Cauce con meandros y entretrenzado
Ordenes de las corrientes	Tercer orden	Primer orden	Primer orden	Tercer orden
Densidad de la red fluvial km/km ²	1.01 a 1.90	> 1.01	1.41 a 2.05	1.01 a 1.90
Profundidad de disección vertical	20 a 240m	20 a 160m	20 – 80m	> 20 m
Estructura geológica	Plegamientos	Bloque levantado	Flujos masivos de Conglomerados	Planicie acumulativa
Formación Geológica	Formación Zapotitlán y San Juan Raya	Formación Miembro agua de Burro	Formación Zapotitlán y Cuaternario	Aluvión del Cuaternario
Litología	Lutitas, calizas rocas ígneas y metamórficas	Calizas	Conglomerados y lutitas	Aluvión y Cooluvión
Denudación	Moderada en calizas y fuerte en lutitas	Ligera	Muy fuerte	Fuerte
Erosión	Moderada	Moderada	Moderada	De moderada a fuerte



Figura 16. Posición de una de las terrazas fluviales dentro del contexto de la cuenca.

La cuenca estudiada es espacio geográfico complejo, debido a que es un área con una historia muy antigua y dinámica, donde han ocurrido múltiples cambios desde su formación hasta la actualidad. Es un sitio de origen endógeno tectónico, que de acuerdo con Calderón (1956), Alencáster (1956) y Barceló (1978) se formó desde el Paleozoico, posteriormente en el Triásico tardío empezaron a emerger las primeras rocas calizas marinas, después a fines del Cretácico y principios del Terciario, se dio la gran orogénesis a través del plegamiento de las rocas previamente formadas, esto también desencadenó fuertes procesos erosivos, lo que dio origen a formas exógenas secundarias como los piedemontes, terrazas (Fig. 16) y abanicos aluviales. La complejidad geológica, geomorfológica y biótica ha repercutido también en la heterogeneidad edáfica del área.

8.2 Resultados monitoreo de la dinámica de las propiedades de los suelos

8.2.1 Aspectos generales

Los resultados obtenidos indican que las dos terrazas estudiadas no obstante que comparten un origen y posición geográfica común, presentan distintas características geomorfológicas, edáficas y sinecológicas. En la terraza **A** el suelo es profundo, pedregoso y compacto con un horizonte superficial orgánico de 4 mm de espesor, constituido de hojarasca, ramas y vainas (Fig.17). Debajo de esta capa subyace un horizonte mineral de color pardo, ligeramente compacto con estructura poliédrica subangular fina pobremente desarrollada, con textura franco arenosa, consistencia suelta, ligeramente plástico y sin adhesividad. Las raíces de tamaño fino y mediano son frecuentes, escasos residuos orgánicos, frecuentes gravas y de reacción ligera a la presencia de carbonatos. El subsuelo es pedregoso, de color pardo pálido, compacto, escasa agregación, las partículas se comportan de manera individual, las raíces finas son escasas y frecuentes las de tamaño medio, la reacción a los carbonatos es ligera. En la terraza **D** el suelo es profundo, sin pedregosidad, compacto y masivo con un horizonte superficial mineral de color pardo, ligeramente compacto con estructura masiva y poliédrica subangular fina pobremente desarrollada, con textura franco arcillo limosa o franco arcillosa, consistencia friable, plástico y adhesivo. Las raíces de tamaño fino y mediano son escasas así como los residuos orgánicos, la reacción a la prueba de carbonatos es violenta. El subsuelo es masivo, compacto, de color pardo pálido, escasa agregación, las raíces finas son escasas y frecuentes las de tamaño medio, la reacción a la prueba de carbonatos es muy violenta.

En cuanto a las principales diferencias morfológicas entre el suelo protegido y el desnudo en ambas terrazas (**A** y **D**), es que el primero presenta una capa delgada de residuos orgánicos sobre la superficie, además la superficie es más abierta y porosa; en tanto que el suelo desnudo como se puede apreciar en la figura 17 no tiene residuos orgánicos y es más compacto. Otra diferencia muy notoria pero que sólo se manifiesta en la terraza **D**, es que el suelo desnudo presenta en la superficie costras físicas y microbióticas, en tanto que el suelo protegido no las presenta. Una diferencia más es la cantidad de raíces, que aunque no se cuantificaron, si se aprecia un menor contenido de raíces en el suelo desnudo. Desde la perspectiva de la geomorfología, la terraza **D** presenta mantos aluviales más antiguos, más profundos, más estratificados, con granulometría más fina y que los de la terraza **A**, además la terraza **D** está muy fragmentada y la **A** no lo está. Por otra parte, procesos como la erosión, la remoción y re-depositación son más activos en la terraza **D**, en este sentido la terraza **A** es más estable.

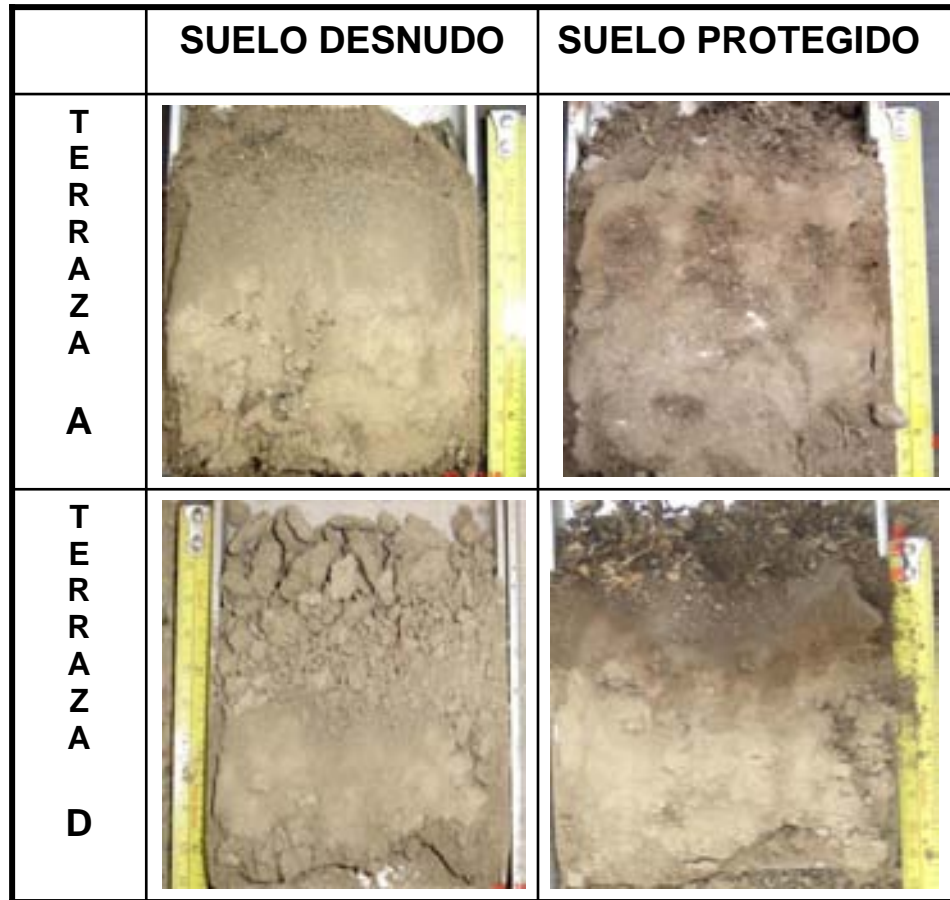


Figura 17. Secciones morfológicas de los primeros 10 cm de suelo de las dos terrazas y bajo las dos condiciones (desnudo y protegido)

8.2.2 Resultados del monitoreo de las propiedades en los dos tipos de suelo y bajo las distintas condiciones de uso del suelo.

Con los datos obtenidos durante cuatro años consecutivos (tres visitas por año) a cada sitio se construyó una base de datos matricial colocando en las columnas la clave del sitio, el tipo de suelo (Terrazas **A** o **D**), la condición (suelo desnudo, suelo protegido o uso agrícola) y cada uno de las propiedades evaluadas; en los renglones o filas se colocaron las fechas de los muestreos de cada sitio, el número total de registros incluidos en la base es de 1,890, mismos que se encuentran en el anexo en los cuadros A, B, y C. Los promedios de los datos se muestran en los cuadros 7 y 8.

Cuadro 7. Medias, desviación estándar, varianza y valores máximos y mínimos de las propiedades evaluadas durante cuatro años en los sitios de la terraza D.

Sitio	Arena	Limo	Arcilla	D.A.	Poros	M.O.	pH	CICT	Ca++	K+	N	P ₂ O ₄	CO ₃	C.E	Infiltra	Tensión	Compacta	Cap. Campo
	%	%	%	kg/m ³	%	%		Cmol(+) Kg-1	Cmol(+) Kg-1	Cmol(+) Kg-1	%	ppm	%	dSm -1.	mm/hr	centibar	%	%
M1-D																		
Prom	25.50	52.17	22.50	1.18	52.47	2.12	7.95	16.83	15.38	1.20	0.12	3.17	21.62	3.51	42.58	38.33	44.57	36.78
Desv Estándar	7.39	5.73	2.81	0.15	3.24	0.65	0.29	1.92	2.15	0.78	0.03	1.42	3.84	3.36	7.23	5.40	12.91	8.75
Varianza	54.64	32.88	7.91	0.02	10.52	0.43	0.08	3.70	4.62	0.61	0.00	2.02	14.71	11.31	35.60	29.15	166.65	50.48
Máximo	44.00	58.00	27.00	1.65	56.85	3.65	8.49	21.73	19.50	2.73	0.17	5.50	31.72	11.23	58.00	44.00	61.93	58.76
Mínimo	18.00	38.00	18.00	1.07	48.00	1.15	7.43	15.18	12.24	0.32	0.08	1.00	17.14	0.55	24.00	28.00	20.00	23.38
M2-D																		
Prom	18.00	47.00	35.00	1.12	53.21	3.46	8.28	21.01	17.65	1.39	0.18	4.50	29.95	1.39	52.75	35.00	41.29	50.22
Desv Estándar	1.63	3.46	3.83	0.06	2.61	0.77	0.27	1.46	2.19	0.17	0.04	3.11	1.98	0.53	5.80	6.63	34.51	4.42
Varianza	2.67	12.00	14.67	0.00	6.80	0.60	0.07	2.14	4.78	0.03	0.00	9.67	3.92	0.29	36.92	44.00	1191.03	19.55
Máximo	20.00	50.00	38.00	1.17	56.10	4.54	8.55	22.01	20.82	1.53	0.23	8.00	32.22	1.99	70.00	44.00	73.40	56.60
Mínimo	16.00	44.00	30.00	1.04	50.65	2.72	7.97	18.89	16.17	1.15	0.15	1.00	28.20	0.90	35.00	30.00	7.62	46.95
M3-D																		
Prom	28.00	52.00	20.00	0.97	55.30	4.59	7.82	21.66	16.81	1.66	0.25	6.68	15.27	4.60	125.08	29.83	49.29	43.87
Desv Estándar	3.62	2.92	2.80	0.06	1.66	1.28	0.20	2.21	1.51	1.19	0.07	1.63	3.78	4.61	4.88	7.32	9.89	7.75
Varianza	13.09	8.55	7.82	0.00	2.76	1.63	0.04	4.91	2.29	1.42	0.00	2.66	14.31	21.25	35.27	53.61	97.75	60.01
Máximo	36.00	57.00	24.00	1.05	57.80	6.90	8.08	25.18	19.77	3.25	0.36	9.00	20.90	13.27	267.00	40.00	63.44	55.70
Mínimo	22.00	46.00	16.00	0.84	52.52	2.37	7.45	18.68	15.15	0.37	0.13	4.00	10.32	0.77	44.00	18.00	36.00	34.18
M4-D																		
Prom	20.09	54.27	26.36	1.14	51.89	1.74	8.34	17.40	15.01	1.24	0.11	2.14	24.47	1.11	55.09	50.27	70.23	29.15
Desv Estándar	3.36	1.95	2.77	0.02	2.92	0.51	0.34	1.54	2.64	0.80	0.05	0.92	2.02	1.25	5.31	6.83	11.44	10.79
Varianza	11.29	3.82	7.65	0.00	8.50	0.26	0.12	2.36	6.97	0.65	0.00	0.85	4.10	1.55	44.49	46.62	130.89	116.51
Máximo	26.00	56.00	30.00	1.18	55.48	2.52	8.76	20.29	18.89	2.93	0.21	4.00	27.50	4.80	81.00	60.00	84.20	46.30
Mínimo	16.00	50.00	20.00	1.12	44.50	1.23	7.88	15.55	11.57	0.45	0.04	1.00	21.40	0.41	33.00	40.00	48.40	18.58
M1-C																		
Prom	49.42	34.83	15.58	0.88	56.46	9.81	7.55	28.96	19.92	2.37	0.50	7.21	17.59	1.55	568.75	36.67	51.75	64.00
Desv Estándar	4.87	5.61	2.31	0.09	4.83	3.82	0.15	3.43	3.95	1.64	0.15	2.77	2.93	0.27	4.42	12.23	19.39	12.59
Varianza	23.72	31.42	5.36	0.01	23.32	14.61	0.02	11.77	15.58	2.70	0.02	7.66	8.58	0.07	32.66	149.52	375.98	158.45
Máximo	56.00	44.00	18.00	1.04	65.60	16.76	7.83	33.64	26.20	5.43	0.82	11.00	22.50	2.26	843.00	60.00	88.67	85.90
Mínimo	40.00	26.00	12.00	0.74	50.35	5.18	7.30	22.27	14.77	0.52	0.30	1.00	14.00	1.27	242.00	20.00	18.80	40.21
M2-C																		
Prom	50.00	27.00	23.00	0.85	58.29	10.67	7.68	31.22	25.38	2.34	0.54	10.35	21.49	1.85	636.60	33.60	24.22	66.44
Desv Estándar	9.49	5.57	4.36	0.06	3.71	2.55	0.32	4.02	4.59	0.78	0.06	7.19	2.33	0.72	5.31	2.61	14.19	7.85
Varianza	90.00	31.00	19.00	0.00	13.75	6.52	0.10	16.13	21.04	0.61	0.00	51.74	5.44	0.52	41.30	6.80	201.30	61.57
Máximo	62.00	34.00	30.00	0.89	64.90	14.47	8.12	36.29	32.64	3.43	0.60	22.75	24.30	2.65	864.00	38.00	43.90	75.03
Mínimo	36.00	19.00	19.00	0.75	56.38	7.58	7.34	26.71	21.68	1.43	0.46	5.00	19.26	1.04	481.00	32.00	10.55	54.80
M3-C																		
Prom	33.67	47.25	19.08	0.90	57.06	8.24	7.59	25.46	19.51	1.43	0.40	11.58	9.63	2.12	283.12	32.50	42.76	63.73
Desv Estándar	5.58	5.71	2.81	0.07	7.29	3.83	0.26	3.24	2.11	0.97	0.16	2.43	3.32	1.03	6.34	4.44	8.72	6.99
Varianza	31.15	32.57	7.90	0.01	53.09	14.65	0.07	10.52	4.43	0.94	0.02	5.90	11.04	1.06	54.19	19.73	76.06	48.86
Máximo	42.00	54.00	24.00	0.97	70.00	15.00	7.99	30.54	22.42	3.16	0.71	15.00	15.70	3.62	590.00	40.00	57.40	75.14
Mínimo	26.00	38.00	16.00	0.72	41.70	3.45	7.06	20.75	16.45	0.28	0.15	8.00	5.90	0.66	144.00	24.00	27.30	49.65
M1-TA																		
Prom	17.60	46.80	37.20	1.15	51.71	2.68	8.31	21.18	18.25	1.08	0.17	3.45	29.59	1.49	36.40	29.80	34.76	51.84
Desv Estándar	4.77	4.60	2.68	0.03	3.11	0.96	0.21	2.17	1.75	0.18	0.04	2.12	1.44	0.60	4.39	9.04	8.67	6.61

Cuadro 8. Medias, desviación estándar, varianza y valores máximos y mínimos de las propiedades evaluadas durante cuatro años en los sitios de la terraza A.

Sitio	Arena	Limo	Arcilla	D.A.	Poros	M.O.	pH	CICT	Ca ⁺⁺	K ⁺	N	P ₂ O ₄	CO ₃	C.E	Infiltra	Tensión	Compacta	C. Campo
	%	%	%	kg/m ³	%	%		Cmol(+) Kg-1	Cmol(+) Kg-1	Cmol(+) Kg-1	%	ppm	%	dSm -1.	mm/hr	centibar	%	%
M5-D																		
Prom	68.33	19.83	11.83	1.29	46.71	2.91	8.16	17.31	14.30	1.53	0.12	8.87	8.87	0.78	273.33	33.42	60.12	43.73
Desv Estandar	3.80	2.98	1.11	0.06	3.32	0.72	0.30	2.16	2.27	1.00	0.05	2.37	2.37	0.16	8.42	5.42	12.91	6.01
Varianza	14.42	8.88	1.24	0.00	11.05	0.53	0.09	4.67	5.14	1.00	0.00	5.62	5.62	0.02	62.4	29.36	166.64	36.07
Máximo	74.00	26.00	14.00	1.38	50.89	4.33	8.58	21.84	17.90	3.58	0.21	13.21	13.21	1.23	435.00	40.00	77.99	55.33
Mínimo	60.00	15.00	10.00	1.14	39.90	1.87	7.69	14.82	10.29	0.54	0.06	5.00	5.00	0.63	160.00	22.00	28.20	32.45
M5-C																		
Prom	71.50	18.33	10.17	1.16	51.69	4.52	7.86	20.28	14.24	2.70	0.22	8.75	4.49	1.00	552.33	26.25	53.29	32.07
Desv Estandar	3.42	3.28	1.70	0.03	1.23	0.88	0.23	1.16	2.30	1.87	0.07	1.86	2.50	0.22	6.96	5.86	14.70	16.22
Varianza	11.73	10.79	2.88	0.00	1.51	0.77	0.05	1.35	5.29	3.51	0.01	3.48	6.25	0.05	59.69	34.39	216.19	262.95
Máximo	78.00	28.00	12.00	1.20	53.62	6.37	8.19	22.04	17.72	5.92	0.38	12.00	8.21	1.46	737.00	42.00	81.83	59.82
Mínimo	64.00	15.00	7.00	1.11	49.20	3.07	7.43	18.32	10.30	0.62	0.13	6.00	0.71	0.75	320.00	20.00	30.80	18.96
M6-C																		
Prom	73.50	17.75	8.75	1.09	54.86	3.64	7.86	21.57	18.46	1.62	0.18	9.50	9.50	1.03	7.92	24.33	57.93	47.63
Desv Estandar	4.70	4.56	1.36	0.08	2.85	0.90	0.34	3.18	4.56	1.02	0.06	2.25	2.25	0.20	6.53	2.87	12.59	5.77
Varianza	22.09	20.75	1.84	0.01	8.12	0.81	0.11	10.12	20.80	1.04	0.00	5.05	5.05	0.04	64.17	8.24	158.51	33.33
Máximo	80.00	28.00	12.00	1.33	59.53	5.12	8.53	25.84	25.84	3.80	0.31	14.70	14.70	1.29	1160.00	30.00	79.84	59.88
Mínimo	64.00	12.00	7.00	1.04	47.56	2.11	7.46	16.73	13.27	0.62	0.12	5.93	5.93	0.61	344.00	18.00	36.60	38.21
M2-TA																		
Prom	46.43	37.57	16.00	0.86	55.48	8.42	7.52	29.03	19.71	3.44	0.51	59.55	18.08	1.44	643	38	56	43.73
Desv Estandar	5.47	6.11	2.83	0.09	1.57	3.13	0.16	3.97	4.10	2.26	0.17	14.91	3.71	0.18	317	12	14	6.01
Varianza	11.79	16.25	17.68	10.77	2.84	37.20	2.14	13.67	20.78	65.52	32.62	25.03	20.49	12.78	49	32	24	36.07
Máximo	52.00	46.00	18.00	1.01	57.58	14.82	7.71	33.64	24.25	7.43	0.82	76.00	22.50	1.76	1242	56	72.52	32.45
Mínimo	36.00	30.00	12.00	0.74	53.46	5.18	7.30	22.27	14.77	0.81	0.30	36.39	14.00	1.27	242	20	31.81	55.33

Para evaluar el efecto e interacciones de los factores: suelo tiempo y condición sobre las 18 propiedades estudiadas, se aplicó un análisis de varianza multivariado (véase cuadro 9), que indica que los tres factores tuvieron un efecto significativo sobre alguna de las propiedades estudiadas, también se observa que no existen interacciones entre factores (Cuadro 10).

Cuadro 9. Valores de **F** y **p** del análisis de varianza multivariado (MANOVA), considerando todas la propiedades del suelo.

Propiedad	Tiempo	Terraza	Condición
Arena	F=3.09 P=.0532	F=229.71 P=.0000**	F=13.69 P=.0005**
Limo	F=3.62 P=.0334*	F=227.30 P=.0000**	F=8.07 P=.0063**
Arcilla	F=.4362 P=.6487	F=80.43 P=.0000**	F=14.53 P=.0004**
Densidad aparente	F=.0357 P=.9649	F=79.27 P=.0000**	F=51.15 P=.0000**
Porosidad	F=1.27 P=.2881	F=24.53 P=.0007**	F=23.35 P=.0001**
Materia orgánica	F=.7952 P=.4566	F=2.23 P=.1408	F= 25.13 P=.0007**
PH	F=2.76 P=.0718	F=6.53 P=.0134*	F=22.25 P=.0001**
CICT	F=.1226 P=.8849	F=.5540 P=.4599	F=3.01 P=.0884
Ca++ intercambi	F=1.66 P=.1998	F=2.18 P=.1452	F=2.24 P=.1399

* diferencias significativas ($p < 0.05$)

** diferencias significativas ($p < 0.01$)

Propiedad	Tiempo	Terraza	Condición
K++	F=2.31 P=.1087	F=.3355 P=.5648	F=3.84 P=.0552
N total	F=.3084 P=.7359	F=.3460 P=.5588	F=14.42 P=.0004*
P soluble	F=.4260 P=.6447	F=.5690 P=.4539	F=.1133 P=.7377
CO ₃	F=.0541 P=.9474	F=35.63 P=.0000**	F=8.51 P=.0051**
Conductividad eléctrica	F=.8506 P=.4327	F=4.98 P=.0297*	F=.0003 P=.9868
Infiltración	F=.4282 P=.6538	F=13.21 P=.0006**	F=39.08 P=.0000**
Tensión	F=.4621 P=.6224	F=12.06 P=.0010**	F=7.67 P=.0077
Compactación	F=.7859 P=.4608	F=4.79 P=.0328*	F=2.13 P=.1499
Capacidad de campo	F=.7859 P=.4608	F=.1226 P=.8849	F=4.79 P=.0328*

El valor **F** sirve para comprobar la significancia de la relación entre las variables que se están evaluando, se obtuvo al comparar el valor del coeficiente de correlación lineal con el valor que viene en la tabla de Fisher (F). Por otra parte, **p** significa el nivel de confianza, que es el número de errores permitidos por cada 100 ensayos, obtenidos a partir de los grados de libertad.

Cuadro 10. Análisis de varianza multivariado.

Efecto	Lambda de Wilks	P
Tiempo	.2542	.00167**
Suelo	.0878	.0000**
Condición	.2970	.000006**
Año*Zona	.4777	.4509
Año* condición	.5307	.6888
Zona* condición	.6770	.3925
Año*zona*condición	.6387	.9619

** Efectos significativos ($p < 0.01$)

8.2.2.1 Análisis de factor tiempo (cuatro 4 años) Vs. Propiedades

La mayoría de las propiedades evaluadas no mostraron variación estadísticamente significativa con respecto al tiempo, esto significa que cuatro años de monitoreo no son suficientes para entender la dinámica edáfica. La IUGS (2001) y Paz *et al.* (2006) señalan que para monitorear las propiedades del suelo se requiere hacer observaciones por lo menos durante 10 años.

Sólo el limo ($F=3.62$, $P=.0334$) tuvo diferencias estadísticamente significativas con respecto al tiempo (Cuadro 9 y figuras 18 y 19). La fluctuación del limo a través del tiempo se debe a su gran movilidad favorecida por su tamaño pequeño que hace que pueda ser transportado con facilidad por el agua o viento, a esto hay que agregar que el limo carece de carga, lo que impide que se agrupe con otras partículas y forme agregados de mayor peso y más resistentes al movimiento. Hay que considerar que los suelos estudiados sobre todo el de la terraza **D** presentan elevados porcentajes de limo, en las figuras 18 y 19, se puede apreciar que el suelo de la terraza **D** tiene más contenido de limo que el de la terraza **A**. La figura 18 muestra un comportamiento muy variable del limo en la mayoría de los sitios de la terraza **D**, sin una tendencia clara; de manera particular destaca el sitio M1-C porque que presenta alti-bajos muy notorios como el que se observa en agosto de 2002, el cual se debió al impacto que recibió el sitio en ese momento ya que se talaron varios árboles y se introdujo ganado caprino; esta acción provocó una gran remoción de suelo. En la terraza **A** (Fig. 19) el comportamiento del limo es similar al de la **D**, sólo mostrándose una mayor variación en el suelo agrícola lo cual se debe al manejo del terreno. En ambas figuras 18 y 19 no es posible apreciar algún tipo de tendencia ascendente o descendente, sólo se observa que hay ciertos periodos o temporadas donde se deposita y otras donde se remueve, este comportamiento está determinado principalmente por la precipitación y sobre todo por el agua de escurrimiento que es la que se encarga de mover al limo (Dregne 2002). Donde si es posible apreciar una tendencia en el incremento del limo es en algunas depresiones y micro-relieves cóncavos donde el agua se queda estancada, aquí el agua deposita con frecuencia limo y otras sales, provocando la formación de costras de sedimentación donde el limo es la partícula más dominante (Fig. 20). Lo si queda claro es que faltan más años de observaciones para poder entender mejor la dinámica del limo, ya que nuestra ventana de observación es todavía muy estrecha y limitada.

Lavauden (1927) citado por Dregne (2002) uno de los primeros autores en escribir acerca del tema de la desertización, señala que el limo es la partícula que más se mueve en los eventos fluviales; en una evaluación que hizo en zonas montañosas semiáridas de Marruecos y Argelia indica que anualmente se remueven 800,000 m³ de limo. Oldeman (1998) indica que el limo es una partícula muy vinculada con la degradación física del suelo, ya que propicia el encostramiento superficial al obstruir los poros y sellar la superficie, lo que favorece la formación de costras por sedimentación. El limo tiene un efecto potenciador del apelmazamiento y sellado (sobre todo el fino) Soriano *et al.* (2000). Las arenas y arcillas no presentan

diferencias estadísticamente significativas con respecto al tiempo, las arenas son grandes y pesadas, por lo que ofrecen mayor resistencia al movimiento. Las arcillas son muy pequeñas, sin embargo tienen carga eléctrica esto provoca que se agrupen unas con otras para formar agregados que por su tamaño y peso son difíciles de transportar, a menos que ocurran precipitaciones con mucha intensidad. La agregación de las arcillas se ve favorecida por la abundancia de carbonatos que tienen estos suelos.

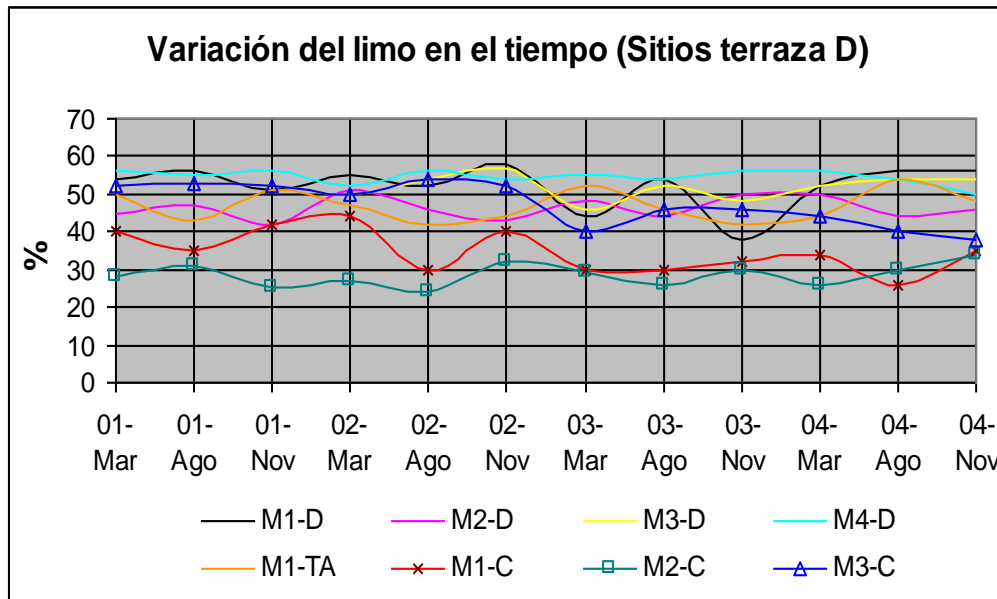


Figura 18. Variación de limo en el tiempo en los distintos sitios de la terraza **D** en cuatro años de muestreo.

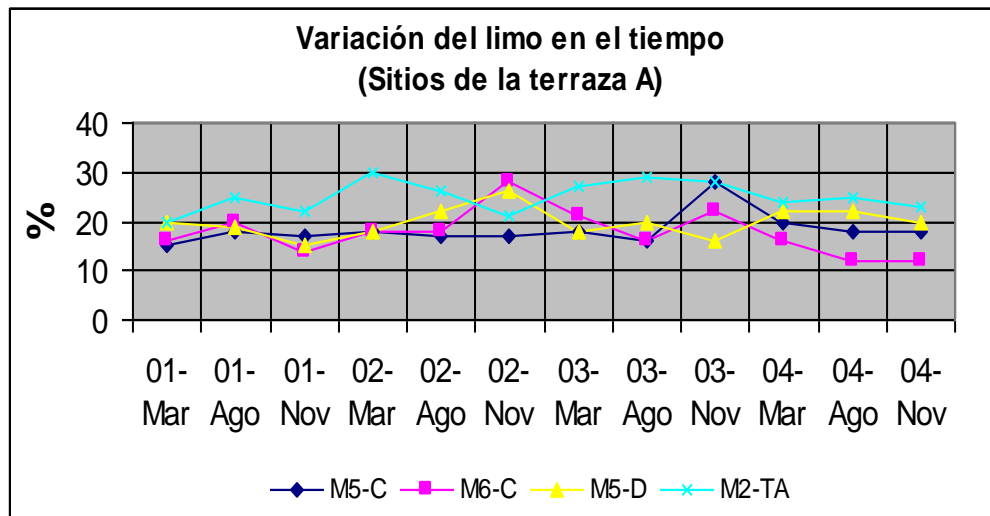


Figura 19. Variación de limo en el tiempo en los diferentes sitios de la terraza **A** en cuatro años de muestreo.



Figura 20. Encostramiento y sellado del suelo por incremento de limo (Fotografía del sitio M2-D, marzo de 2002)

8.2.2.2 Análisis del factor tipo de suelo (terrazza **A**- suelo *F.* arenoso Vs terraza **D**-suelo *F.* arcillo-limoso)

Como ya se mencionó, se tomaron muestras de suelo en dos terrazas distintas. Estas terrazas presentan suelo con distinta textura del horizonte superficial; en la terraza **A** la textura es franco arenosa, en tanto que en la **D** es franco arcillo limosa; además tienen distinta edad, estratigrafía y morfodinámica, siendo más estable la **A** que la **D** (Fig. 21)



Figura 21. Terrazas **A** (Izquierda) y **D** (Derecha), sitios con diferente estratigrafía, geoquímica, suelos y morfodinámica.

Como era de esperarse la textura del suelo mostró diferencias estadísticamente significativas entre las dos terrazas, en las gráficas de las figuras 22 y 23 se puede observar que ambas terrazas presentan marcadas diferencias en textura. En la terraza **D** dominan más las texturas medias principalmente del tipo franco arcillo – limosa y franco arcillosa, donde el limo es la fracción más abundante (Fig. 22). En la terraza **A** la textura dominante es la franco arenosa, siendo la fracción de arena la que más presencia tiene (Fig. 23). Destaca el hecho que en la terraza **A** los diferentes sitios presentan menos variación en la proporción de los tres tipos de partículas con respecto a los de la terraza **D**, sin importar si el suelo está con o sin vegetación. Otro aspecto interesante a discutir de la terraza **A**, es que el suelo agrícola (M2-TA) es el único que tiene una textura distinta con respecto a los otros sitios de la misma terraza, en el suelo agrícola la proporción de arcilla y limo supera a la arena. Esto se explica por el hecho de que los suelos agrícolas son fuertemente modificados por el manejo que reciben, las practicas de labranza como la nivelación el barbecho y subsoleo, tienden a modificar de manera drástica las proporciones de las fracciones granulométricas ya que eliminan, mezclan o invierten los primeros horizontes del suelo; por otra parte, los suelos agrícolas están más expuestos a la erosión, la cual afecta de manera diferencial a las diferentes clases de

partículas, siendo las partículas más pequeñas y ligeras las más susceptibles a ser removidas (Fig. 24) (Narro, 1994). La terraza **D** muestra mayor variación en la textura (Fig. 22), esto porque ha sido severamente afectada por la erosión y además porque la condición del sitio o el uso del suelo si tiene un efecto considerable en la variación granulométrica como se vera más adelante en el siguiente punto.

Las proporciones entre la arena, limo y arcilla están determinadas por la naturaleza y origen del suelo. De la textura dependen casi todas las propiedades físicas, por eso la densidad aparente ($F=79.27$, $P=.0000$), porosidad ($F=24.53$, $P=.0007$), infiltración ($F=13.21$, $P=.0006$) y tensión de humedad ($F=12.06$, $P=.0010$), resultaron con diferencias estadísticas altamente significativas con respecto al tipo de suelo. Particularmente la infiltración es más rápida en suelos arenosos que en los limosos y arcillosos, ya que las arenas generan poros más grandes. El tamaño de la partícula es fundamental en la regulación del espacio poroso que a su vez determina la conductividad hidráulica y el flujo gaseoso (Narro-Farias, 1994). Por otra parte, la textura también tiene gran influencia en algunas propiedades químicas, como se puede observar en el cuadro 9. El pH ($F=6.53$ $P=.0134$), conductividad eléctrica ($F=4.98$ $P=.0297$) y los carbonatos ($F=35.63$, $P=.0000$) también mostraron diferencias estadísticamente significativas con respecto al tipo de suelo (sitio). Al ver el comportamiento de los valores de las medias (véase cuadros 7 y 8), se puede advertir que en la terraza **A** el pH del suelo es menos alcalino y la conductividad eléctrica tiene valores más bajos. Esto es consecuencia en parte de una textura más gruesa, que favorece una mayor infiltración y una lixiviación más eficiente de las sales en el suelo de la terraza **A**. Los carbonatos también muestran diferencias estadísticas altamente significativas con respecto al tipo de terraza ($F=35.63$, $P=.0000$), esto viene a reforzar la hipótesis de que las dos terrazas estudiadas presentan una geoquímica distinta, es decir, el tipo de material sedimentario que las forman es de diferente composición y procedencia geológica, lo que se ve reflejado en las variaciones significativas en el contenido de carbonatos los cuales influyen también en el pH y conductividad eléctrica. El sedimento de la terraza **A** tiene menos carbonatos que el de la terraza **D**.

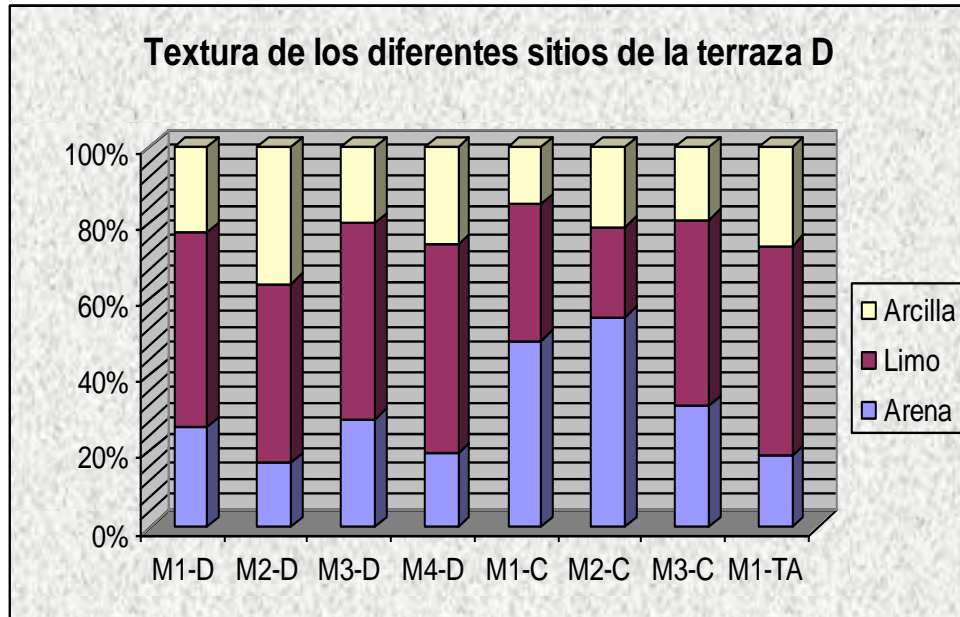


Figura. 22 Variación de la textura en los diferentes sitios y condiciones en la terraza **D**

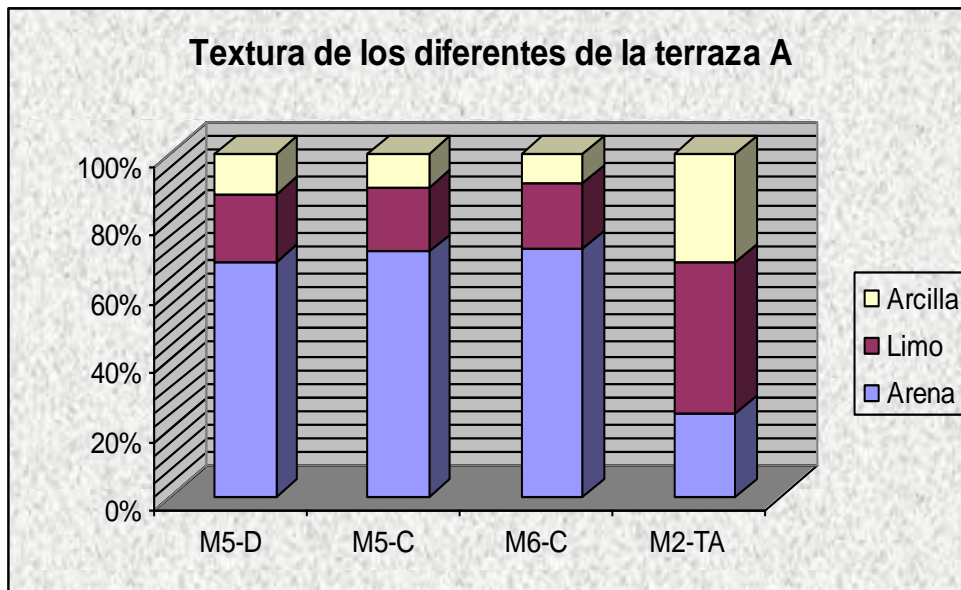


Figura 23. Variación de la textura en los distintos sitios y condiciones en la terraza **A**.



Figura 24. Impacto de las prácticas agrícolas sobre las propiedades de los horizontes superficiales del suelo en las terrazas fluviales de Zapotitlán

8.2.2.3 Factor condición del sitio (suelo desnudo, suelo protegido y suelo agrícola).

La condición del sitio tuvo también un efecto significativo en varias propiedades del suelo (Cuadro 9). En la terraza **D** la proporción de arenas, limos y arcilla fue significativamente diferente entre los sitios con suelo desnudo y los protegidos. En lo general se considera a la textura como una de las propiedades más estables del suelo (IUGS 2001), sin embargo en la superficie del suelo puede haber mucha variación, debido a la influencia de factores externos como el viento, agua de escurrimiento, influencia humana, etc. Los resultados obtenidos muestran que la arena se encuentra en mayor proporción en los suelo protegidos que en los desnudos y los de uso agrícola (Fig. 25), esto concuerda con estudios realizados en islas de fertilidad realizados por Gutiérrez y Saqueo (2004) y Bochet *et al.*(1998) donde han demostrado que el suelo protegido de la isla al tener en su superficie abundante hojarasca, residuos orgánicos y agregados pequeños estables, la erosión disminuye reduciendo con esto el desplazamiento de partículas principalmente del tamaño de las arenas que por su tamaño y peso quedan retenidas entre los agregados y residuos orgánicos ya que ofrecen mayor resistencia al movimiento. En la Terraza **D** el limo es más abundante en los sitios con suelo desnudo y con uso agrícola (Fig. 25) donde se depositan más, favoreciendo el sellado de la superficie del suelo desnudo; esto no significa que los suelos desnudos pierdan las arenas, lo que ocurre es que reciben o ganan más limo y arcilla, provocando con esto una variación en la proporción de las tres clases de partículas. Autores como Oldeman 1988, FAO 1997

y Paz *et al.* 2006, señalan que los suelos que tienen más del 40 % de limo tienen una alta probabilidad de degradación física por encostramiento y sellado. Los sitios con suelo desnudo presentan mayores problemas de encostramiento y sellado porque tienen más limo que los suelos protegidos (Cuadro 7 y fig. 20)

Las variación granulométrica en la terraza **D**, está relacionada en gran medida con la relación infiltración/escorrimento, ya que los suelos protegidos al tener una mayor infiltración, tienen menos escurrimento y menos arrastre de partículas, lo que les confiere mayor estabilidad y menor riesgo de encostrarse.

Para la terraza **A** con excepción del sitio con uso agrícola, las diferencias granulométricas entre los suelos protegidos y desnudos no son tan notorias como ocurre en la terraza **D** (Fig. 26), esto significa que en la terraza **A** el tipo de suelo tiene una influencia más determinante que la misma condición del sitio. Como se mencionó con anterioridad, el suelo de la terraza **A** presenta una textura más arenosa que el de la terraza **D**, por eso las diferencias en el comportamiento de la arena no son tan marcadas como ocurre en la **D**; por otra parte, el limo en todos los sitios supera a la arcilla. El suelo con uso agrícola (TA) muestra una proporción granulométrica diferente a los otros sitios de la misma terraza **A** (Fig. 26); como ya se explicó con anterioridad, esto ocurre por el tipo de manejo que reciben las tierras agrícolas.

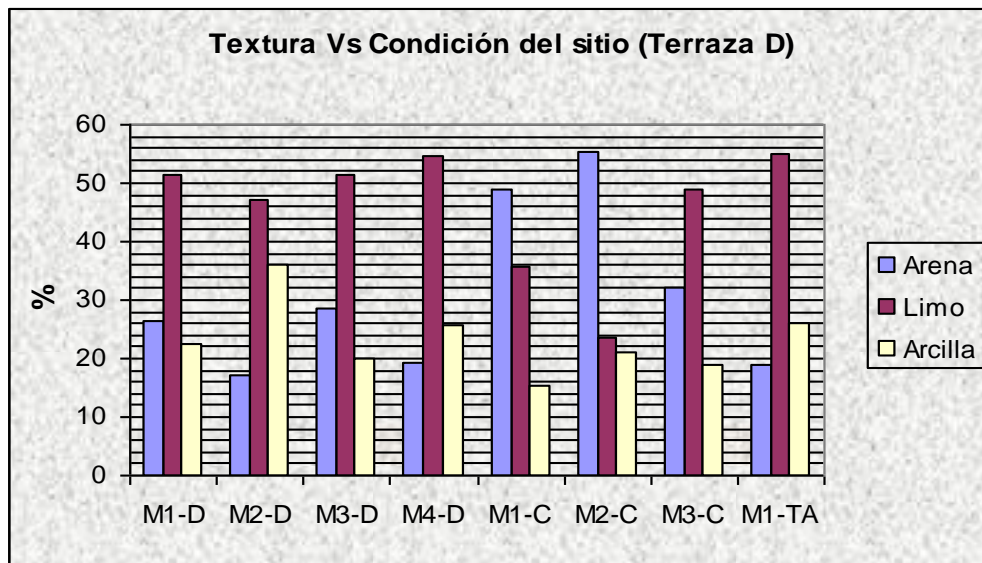


Figura 25. Variación de la granulometría en los diferentes sitios de la terraza **D**. (Se usaron las medias estadísticas de 12 muestreos).

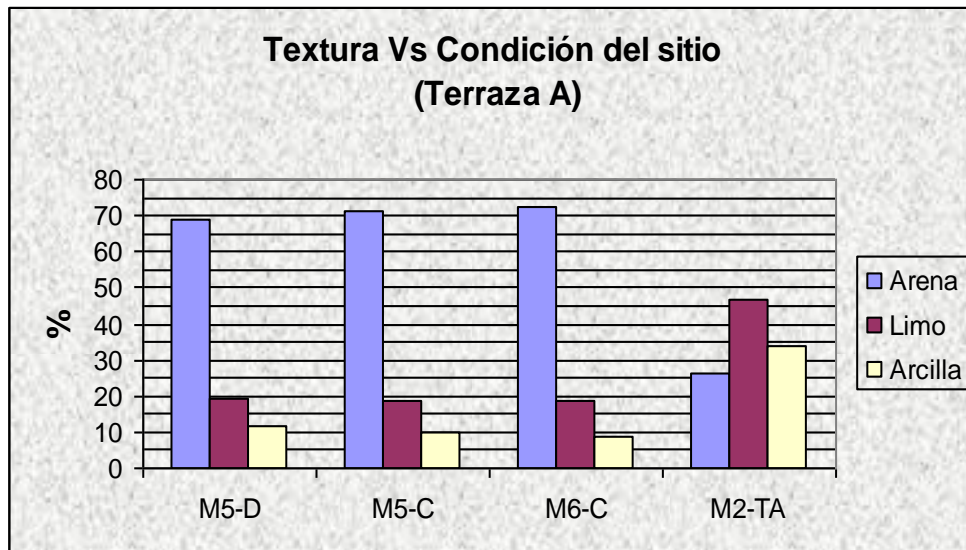


Figura 26. Variación de la granulometría en los distintos sitios de la terraza **A**. (Se usaron las medias estadísticas de 12 muestreos).

Otro aspecto que está influyendo en la variación de las proporciones de la arena, limo y arcilla es el origen de los suelos de las terrazas fluviales, como ya se ha mencionado, estos suelos son formados por el depósito de sedimentos transportados por corrientes fluviales, esto hace que presenten una constitución morfológica muy variable y heterogénea la cual dependerá de factores como son: fluctuaciones del régimen de depositación, la energía de la corriente, tipo de carga, migración del cauce, pendiente del terreno y la manera en que el sedimento es depositado (Derrau 1981, Charlton 2007). Es así que la distribución horizontal y vertical de las partículas de estos suelos depende en gran medida de la manera en que se esparció el sedimento y del tipo de carga que transportó la corriente. Cuando se rebasa el nivel del cauce disminuye bruscamente la velocidad y capacidad de transporte, esto hace que los materiales más grandes y pesados sean depositados en las inmediaciones de los bordes del cauce. Los materiales más finos pueden recorrer mayores distancias y ser sedimentados al decrecer la energía de la corriente, esto determina la formación de varias facies granulométricas en la misma superficie (Zinck 1970). Además hay que agregar que cuando el cauce es rebasado durante los torrentes, el agua inunda la planicie y los sedimentos se depositan siguiendo patrones entre-trenzados, esto confiere mayor variación en la granulometría de los suelos.

Otro elemento más que hay que agregar para explicar la variación granulométrica, es la erosión de la terraza, la cual es rebajada de forma diferencial de acuerdo a la resistencia que ofrecen las distintas facies hacia la erosión, es así que los mantos menos resistentes han perdido por completo los primeros estratos permitiendo el afloramiento de estratos enterrados que tienen distinta granulometría con respecto a la superficie.

Otras propiedades que muestran diferencias estadísticas significativas con respecto a la condición del sitio son la densidad aparente ($F=51.15$, $P=.0000$) y la porosidad ($F=23.35$, $P=.0001$) ambas propiedades están muy relacionadas entre si. Como se puede apreciar en la gráfica de la figura 27 y los valores de los cuadros 7 y 8, la densidad aparente de los sitios con suelo desnudo siempre supera a la de los suelos protegidos en ambas terrazas. Este comportamiento está directamente asociado con la variación de la materia orgánica, los suelos protegidos al tener mayor cantidad de materia orgánica incrementan el volumen del espacio poroso, lo que provoca una disminución de la densidad aparente, porque la materia orgánica pesa poco y ocupa mucho volumen. Estos resultados son similares a los encontrados por Albaladejo *et al.* (1998), cuando evaluaron los cambios de un suelo donde la vegetación fue removida. Voorhes *et al.* (1978) señala que como consecuencia del incremento de la densidad, hay un aumento de la resistencia a la penetración de las raíces mucho más significativa que el aumento de la misma densidad.

Independientemente de la condición del sitio, también se puede ver que los valores de la densidad aparente de la terraza **A** son más altos que los de la terraza **D** (Fig. 27), esto por el efecto que tiene la textura sobre la densidad, los suelos arenosos al ser más pesados tienen densidades mayores que los suelos de textura fina. Con respecto a los suelos agrícolas (TA), en las dos terrazas presentan densidades moderadamente altas con un comportamiento similar al de los suelos desnudos.

La porosidad tiene un efecto inversamente proporcional al de la densidad aparente (Cuadros 7 y 8), lo cual es lógico y normal ya que cuando se incrementa la densidad aparente el suelo se hace más compacto y el espacio poroso se reduce.

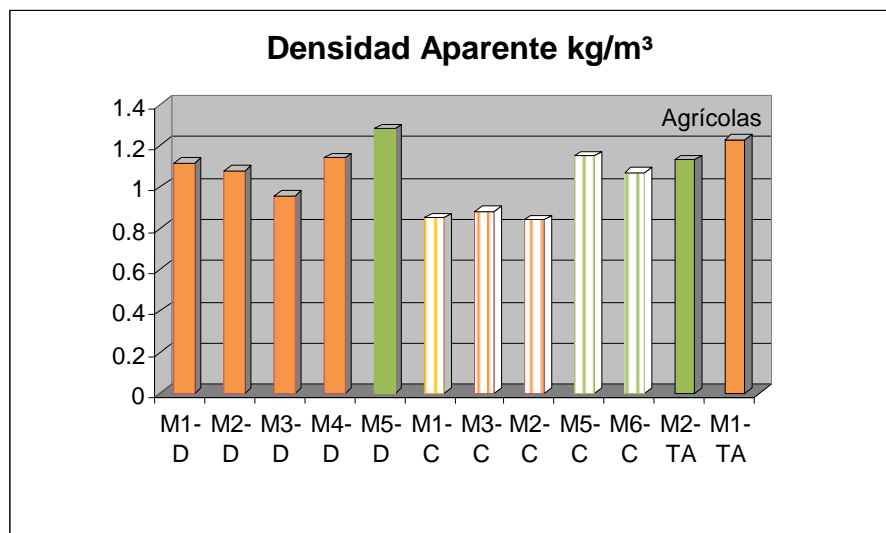


Figura 27. Densidad aparente en los distintos sitios. (Las barras con color naranja corresponden a sitios de la terraza **D** y las verdes a la terraza **A**, las barras con líneas conciernen a los sitios con suelo protegido con vegetación).

La infiltración acumulada es la propiedad que muestra la diferencia significativa más contundente con respecto a la condición del sitio ($F=39.08$, $P=.0000$) y consideramos que es uno de los mejores indicadores del “status” de conservación o degradación del suelo (Fig. 28). La cantidad de agua que puede entrar en un suelo protegido por la vegetación es considerablemente mayor que en el suelo desnudo, el suelo protegido deja pasar más agua por ser más poroso gracias a la materia orgánica y a otras propiedades como la textura y estructura. En el suelo desnudo el impacto de las gotas de lluvia produce la rotura de los agregados y la separación de las partículas. Las partículas más finas van obturando los poros de la superficie del suelo y formando el sello, lo que reduce con mucho la entrada de agua, aumentando el escurrimiento y la erosión. Michelena *et al.* (2002) mencionan que los suelos desnudos al tener bajos contenidos de materia orgánica y altos contenidos de limos, son más propensos a formar sellos, alterando la relación infiltración /escurrimiento. Los suelos agrícolas muestran un comportamiento parecido al de los suelos desnudos, lo cual se atribuye a la inestabilidad estructural determinada por los bajos niveles de materia orgánica que mostraron los suelos agrícolas.

La infiltración es una propiedad que depende en gran medida de la organización estructural del suelo superficial, siendo más elevada en suelos ricos en materia orgánica que presentan agregados granulares o poliedros pequeños ya que éstos propician poros de tamaño adecuado para que el agua penetre a una velocidad adecuada evitando que se pierda por escurrimiento; los suelos con mayores contenidos de materia orgánica siempre van tener una mejor tasa de infiltración (Eldridge & Shachak 2000).

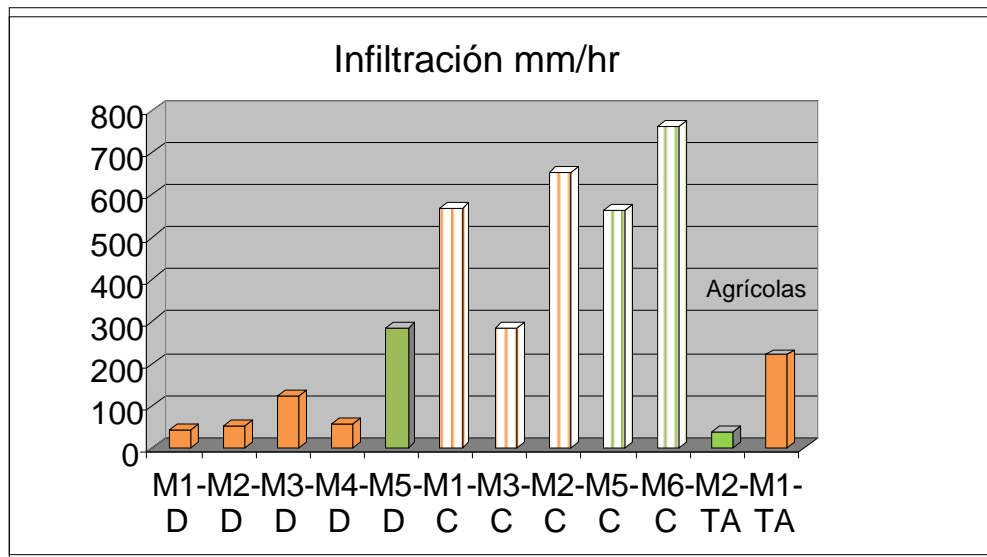


Figura 28. Infiltración acumulada de los diferentes sitios de ambas terrazas. (Las barras con color naranja corresponden a sitios de la terraza D y las verdes a la terraza A, las barras con líneas conciernen a los sitios con suelo protegido con vegetación).

El pH es otra propiedad que presenta variación significativa con respecto al sitio ($F=22.25$, $P=.0001$), presentándose los valores menos alcalinos en los sitios protegidos (Fig. 29). Si se considera que cada una de las terrazas presenta el mismo clima, suelo y geoquímica, entonces la variación significativa en el pH sólo puede ser consecuencia de la condición del sitio, es decir, si el suelo está protegido por la vegetación o no lo está. Es claro que la presencia de la vegetación influye en las características del suelo al crear condiciones ambientales particulares. Ha sido bien documentado que la materia orgánica del suelo tiene un efecto acidificante, ya que durante el proceso de su transformación libera una gran cantidad de ácidos orgánicos (Delvin *et al.* 1989). A esto hay que agregar que los sitios protegidos al tener más materia orgánica y densidades más bajas, presentan una menor evaporación y una mayor infiltración lo que provoca más lixiviación de bases; por el contrario en sitios desnudos, al no contar con la protección de la vegetación la evaporación es más intensa lo que favorece el ascenso y concentración de sales y carbonatos en la superficie, lo cual eleva el pH. Igual que en el caso anterior los suelos agrícolas muestran un pH similar al de los suelos desnudos.

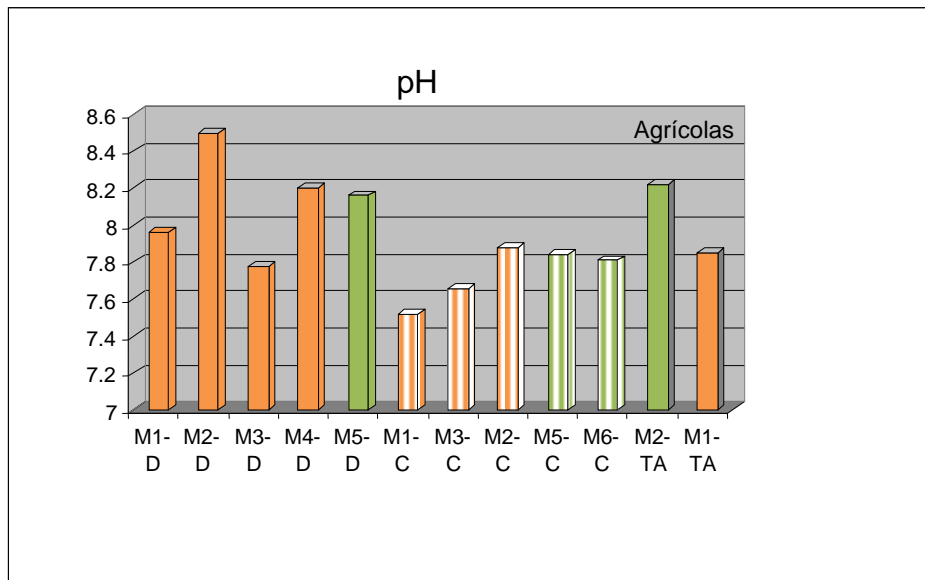


Figura 29. Variación del pH en los diversos sitios. (Las barras con color naranja corresponden a sitios de la terraza **D** y las verdes a la terraza **A**, las barras con líneas conciernen a los sitios con suelo protegido con vegetación).

Por otra parte, los carbonatos también se ven afectados significativamente por la condición del sitio ($F=8.51$, $P=.0051$), observándose que los valores menos altos en los suelos protegidos por la vegetación (Fig. 30). Es muy probable que al haber una mayor infiltración en estos lugares, los carbonatos se lixivien a mayor profundidad, a diferencia de los sitios con suelo desnudo (D) y agrícola (TA) que al infiltrar menos agua y al presentar una evaporación más intensa por estar desprotegidos, los carbonatos se concentran más en la superficie.

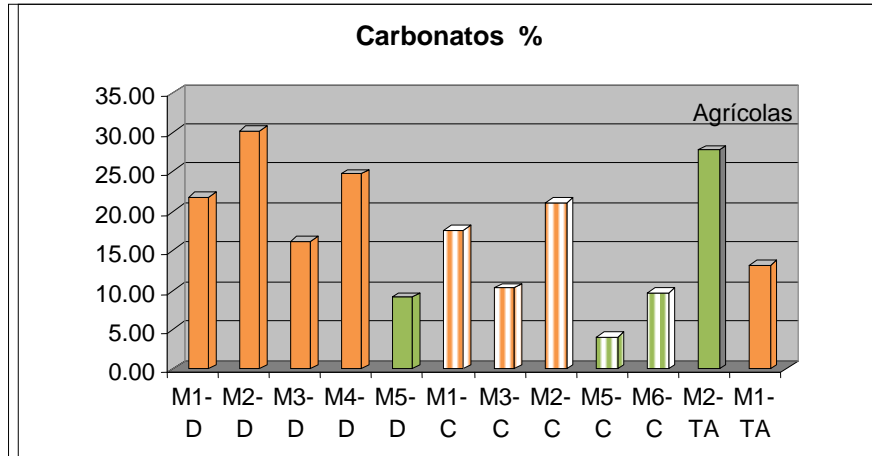


Figura 30. Concentración de carbonatos en los distintos sitios. Las barras con color naranja corresponden a sitios de la terraza D y las verdes a la terraza A, las barras con líneas conciernen a los sitios con suelo protegido con vegetación).

La materia orgánica ($F= 22.25$ y $p= 0001$) y el nitrógeno ($F=16.39$ y $p= 0.0043$) son otras propiedades que muestran comportamiento estadísticamente distinto en los suelos desnudos y protegidos. En la figura 31 y en los cuadros 7 y 8 se aprecia una notoria diferencia entre los sitios con vegetación y los que en apariencia están deteriorados. Es claro que esta diferencia está determinada por la presencia de la cubierta vegetal que es la principal fuente de materia orgánica y de nitrógeno del suelo. Albaladejo *et al.* (1998) indican que cuando la cubierta vegetal es removida, el carbono del suelo decrece significativamente. Los suelos protegidos muestran altos contenidos de materia orgánica y de nitrógeno. En la superficie abundan los residuos orgánicos con bajo grado de descomposición que protegen al suelo casi totalmente, (véase figura 32).

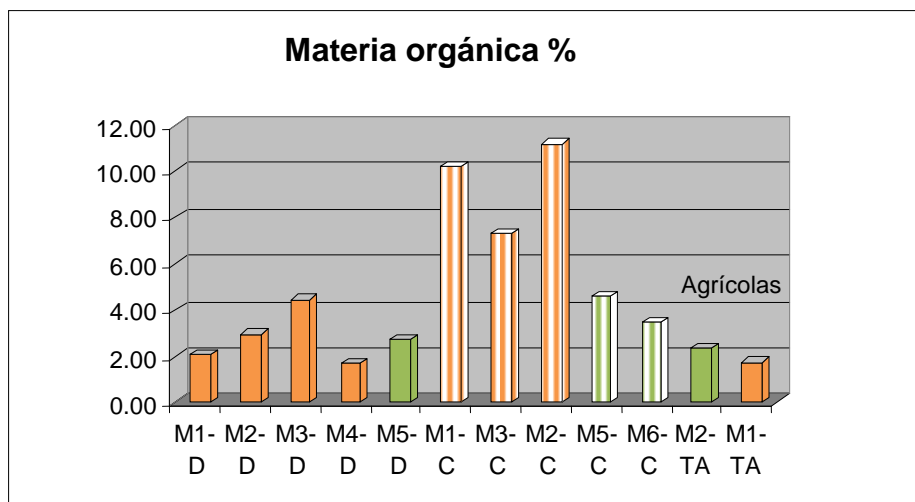


Figura 31. Contenido de materia orgánica en los diferentes sitios. Las barras con color naranja corresponden a sitios de la terraza D y las verdes a la terraza A, las barras con líneas conciernen a los sitios con suelo protegido con vegetación).

Un aspecto que vale la pena resaltar es que el suelo protegido con vegetación de la terraza **A** (M-5 y 6) presenta mucho menos materia orgánica si se compara con los sitios de igual condición de la terraza **D**. Consideramos que esto es consecuencia de las diferencias en la textura del suelo. Como ya se explicó, la terraza **A** presenta más contenido de arenas y menos limos que el de la terraza **D**, esto determina una mayor presencia de poros grandes en el suelo arenoso, lo que ayuda a una oxidación más rápida de la materia orgánica. Por el contrario, en la terraza **D** al tener mayor proporción de partículas finas hay más microporos, esto favorece más la retención de agua y el desplazamiento del oxígeno, lo que retarda el proceso de descomposición de los residuos orgánicos permitiendo su acumulación en el suelo. López-Acevedo (2003) señala que en los suelos con poros grandes la materia orgánica se mineraliza a una tasa muy rápida, sobre todo en los climas secos. Por otra parte, los suelos agrícolas (TA) se comportan de forma similar al suelo desnudo ya que son pobres en materia orgánica.

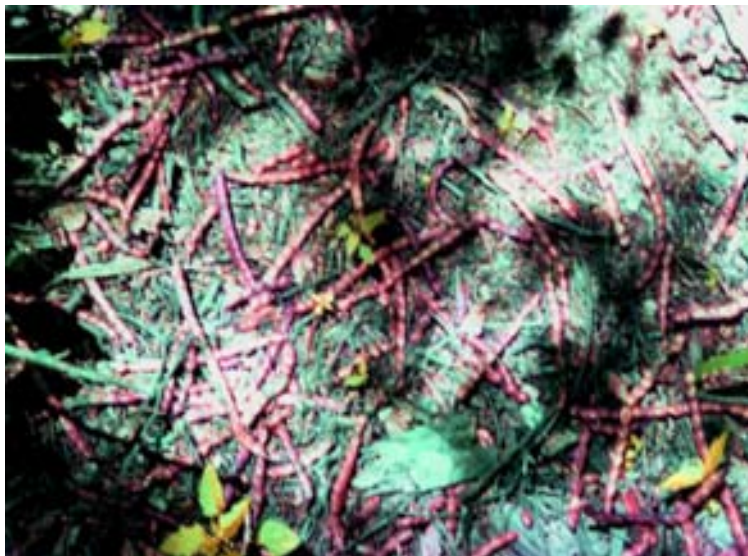


Figura 32. Acumulación de residuos orgánicos en los sitios protegidos (sitio MI-C)

Otra cuestión que conviene discutir es el hecho de que en los suelos desnudos, si bien casi no tienen plantas, los contenidos de materia orgánica no son tan bajos como era de esperarse ($x= 2.79\%$). Una de las posibles explicaciones al respecto es la presencia de costras microbióticas sobre la superficie de los suelos desnudos (Fig. 33). Al parecer las costras microbióticas aportan una buena cantidad de materia orgánica al suelo ya que están compuestas de millones de filamentos de cianobacterias, hongos, líquenes y musgos (Belnap y Lange 2001 y Rivera *et al.* 2005). La reducción del contenido de materia orgánica del suelo causa alteraciones en la densidad, en la capacidad de retención de agua y en la estabilidad de los agregados, contribuyendo a la pérdida de su calidad y de la estabilidad de su estructura. Cuando es bajo el contenido de materia orgánica, se impide la formación de estructuras estables en la superficie, lo que permite una fácil desintegración de los

agregados con la consiguiente dispersión de los coloides y propensión a la formación de sellados y costras (Brasa *et al.* 2001)



Figura 33. Presencia de costras microbióticas en suelos desnudos (Sitio M4-D)

Por último, retomando el resultado aportado por el análisis de varianza multivariado (Cuadros 9 y 10), se puede decir que si bien muchas propiedades mostraron diferencias significativas con respecto a los factores considerados (tiempo, sitio y condición), no se presentan interacciones entre los factores (Cuadro 10). Esto quiere decir que los factores considerados por esta investigación no actúan en conjunto o en combinación, sino que lo hacen de manera independiente afectando a las propiedades del suelo.

8.2.3. Análisis de componentes principales

Se aplicó un análisis de componentes principales con el propósito de conocer la relación entre todas las propiedades evaluadas y formar grupos de variables (componentes) que estuvieran mutuamente relacionadas. Los resultados del análisis mostraron 6 componentes principales los cuales en conjunto explicaron el 71.89% de la variación de los resultados. Los dos primeros componentes explicaron el 43.18%. El primer componente quedó conformado por: arena, limo, arcilla, CO_3 e infiltración. El segundo por la densidad y porosidad, el tercer componente por la compactación, el cuarto por la materia orgánica, el quinto por fósforo y el sexto por la capacidad de intercambio cationico (Cuadro 11). El resultado del análisis de componentes muestra un ordenamiento que parece lógico, donde la textura es el factor más determinante ya que de la proporción entre arenas, limos y arcillas dependen otras propiedades como la densidad aparente, porosidad, infiltración, etc. Tal vez lo que resulta un poco extraño es que la materia orgánica quedó como cuarto componente, cuando se

esperaba que estuviera entre los primeros, como ya ha sido demostrado en múltiples investigaciones, la materia orgánica es una propiedad que influye en mucho en otras.

Cuadro 11. Resultados de análisis de componentes principales

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
Arena	0.951037	0.075892	0.008681	0.052359	0.144424	0.019429
Limo	-0.917683	-0.128572	0.017469	0.005188	-0.189044	-0.027078
Arcilla	-0.915079	0.074072	-0.078188	-0.201942	-0.007082	0.003251
Densidad aparente	0.236911	0.830618	0.205904	-0.017153	0.144768	0.059741
Porosidad	-0.195476	-0.707963	-0.380430	-0.096881	0.104504	-0.079271
Materia Orgánica	-0.082316	-0.346218	0.133912	-0.667901	-0.363202	-0.092026
pH	-0.154198	-0.770203	0.025973	-0.168977	0.234668	-0.129891
C.I.C.T	0.106662	-0.341016	0.229079	0.75903	0.053019	0.787113
Calcio de intercambio	-0.104549	-0.486339	-0.283481	0.004599	0.501834	0.03203
Potasio de intercambio	0.297616	-0.060904	-0.503133	0.201466	-0.233294	-0.197145
Nitrógeno total	-0.198746	0.179113	-0.312801	0.16123	-0.396197	0.312491
Fósforo soluble	0.778977	-0.042234	-0.040175	-0.704561	0.380609	0.192655
Carbonatos	-0.778977	0.132277	-0.092046	0.246034	0.300969	0.185020
Conductividad eléctrica	-0.376805	-0.270047	0.260492	0.228014	0.378556	-0.389757
Infiltración	0.685673	-0.264703	-0.321250	0.079736	0.175646	0.044803
Tensión	-0.596596	0.338967	-0.305835	0.090653	0.107902	0.178443
Explicación de la Variación	4.452655	2.887581	1.373236	1.294006	1.164163	1.050545
Prop. Total	0.261921	0.169858	0.080779	0.076118	0.06848	0.061797

8.2.4 Análisis de clasificación

Se hizo un análisis de ordenación por distancias euclidianas para conocer qué tan similares o tan distintos eran los suelos de los sitios estudiados. El análisis muestra con claridad la formación de tres grupos (Fig. 34), el primero de ellos incluye a los sitios con suelo desnudo o degradados de la terraza **D** (M1-D, M4-D y M2-D), además de los suelos agrícolas de las dos terrazas (M1-TA y M2-TA), este agrupamiento se puede explicar porque todos los sitios están en la misma terraza y presentan la misma condición de tener un suelo desnudo, con excepción del sitio M2-TA, el cual es de la terraza **A**, pero se agrupa aquí por su condición de uso agrícola. El segundo grupo tiene dos subgrupos, el primero lo integran los sitios M3- C y M3-D, los cuales se agrupan por ser los sitios más distanciados espacialmente dentro de la terraza **D** (véase figura 8) y por presentar un suelo con textura más arcillosa que los otros sitios de la misma terraza. El otro subgrupo lo conforman los sitios M1-C y M2-C, los cuales se encuentran muy cerca uno del otro en la terraza **D** (figura 8), además comparten la característica de tener un suelo protegido por vegetación. El tercero y último de los grupos incluye a los sitios M5-D, M5-C y M6-C, que se asocian de manera notoria por pertenecer todos a la terraza **A**. Este agrupamiento está determinado básicamente porque todos comparten un suelo con características

similares, aquí no importó mucho la condición de uso particular de los sitios. El análisis por distancias euclidianas muestra también que los suelos de las dos terrazas son diferentes, por eso están en lados opuestos del dendrograma (Fig. 34), también se observa que los sitios con suelo protegido se agrupan en medio del dendrograma porque comparten las características de tener un suelo protegido con elevados niveles de materia orgánica.

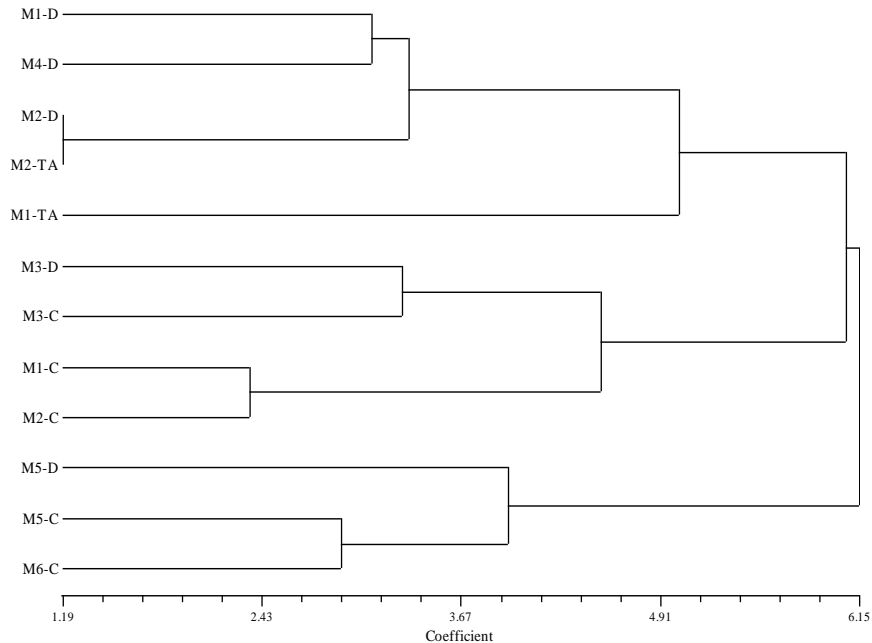


Figura 34. Análisis de similitud por distancias euclidianas

No obstante que las terrazas **A** y **D** pertenecen a la misma unidad de paisaje (planicie de Zapotitlán), presentan suelo con distinta expresión morfológica. La terraza **A** tiene un suelo arenoso, muy pedregoso, con bajo nivel de estructuración, poco consistente, con drenaje rápido. La terraza **D** tiene un suelo limo-arcilloso, con estructura muy desarrollada, fuerte encostramiento, muy compacto y con duripanes. Los tres factores de comparación: tipo de suelo, condición de suelo desnudo, protegido y agrícola y el tiempo de monitoreo, tuvieron un efecto significativo sobre las variables estudiadas ya que presentaron diferencias significativas en los años, zonas y condiciones, también se observa que no existieron interacciones entre los factores (Cuadro 10). Doce de las variables evaluadas sí presentaron relaciones significativas con respecto a alguno de los factores de comparación (Cuadro 9). Por otra parte, al analizar la relación entre las propiedades estudiadas se definieron tres grupos o componentes de variables mutuamente relacionadas. Algo que destaca es que sólo el limo presentó diferencias estadísticas significativas con respecto al tiempo. Las propiedades que reflejan mejor el estatus de conservación, degradación o uso del suelo fueron: textura (limo), pH, infiltración y materia orgánica.

8.3. Análisis del comportamiento de la vegetación

Por lo que respecta al comportamiento de la vegetación en las dos terrazas estudiadas, ambas presenta un matorral espinoso donde las especies fisonómicamente dominantes son *Prosopis laevigata*, *Parkinsonia praecox*, *Pachycereus hollianus* y *Myrtillocactus geometrizans*, sin embargo al analizar los listados florísticos de cada sitio, se puede observar algunas diferencias importantes, en el anexo de este trabajo se presentan los listados florísticos de cada uno de los sitios. Como se puede observar en la gráfica de la figura 35, el sitio con mayor diversidad vegetal fue el M5-C de la terraza **A**, con 31 familias y 71 especies, de acuerdo a esto se podría decir que es el más conservado, le sigue el sitio M1-C de la terraza **D**, con 28 familias y 43 especies. La familia de las cactáceas es la que más especies aporta y es la única que tiene presencia en todos los sitios, le sigue en importancia la Asteraceae y después la Acanthaceae. Como se puede apreciar en el gráfico de la figura 36, los sitios con mayor diversidad de familias son el M1-C (terraceza **D**) y M5-C (terraceza **A**). De acuerdo a lo anterior, se puede decir que los sitios más perturbados en cuanto a la vegetación se refiere son el M3-C y el M4-D.

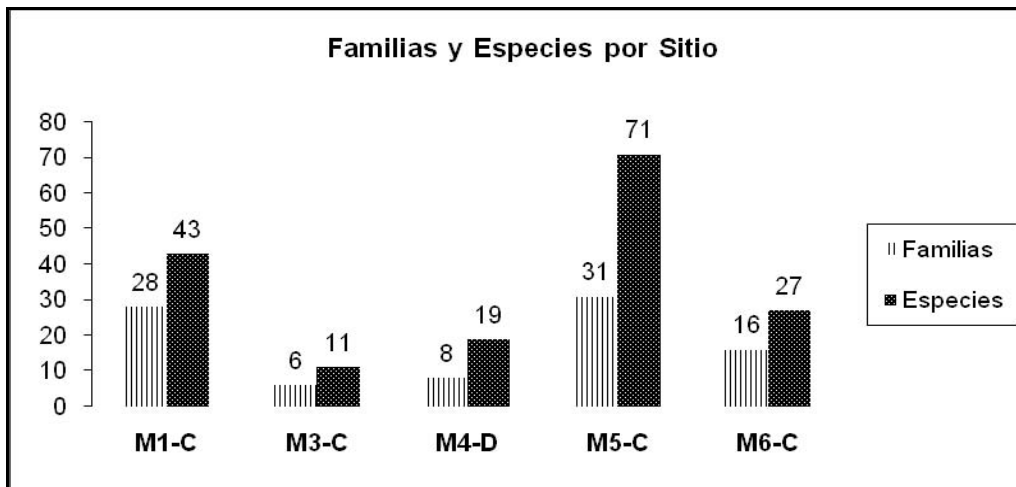


Figura 35. Gráfico que muestra la relación entre el número de familias y especies de plantas vasculares de cada sitio.

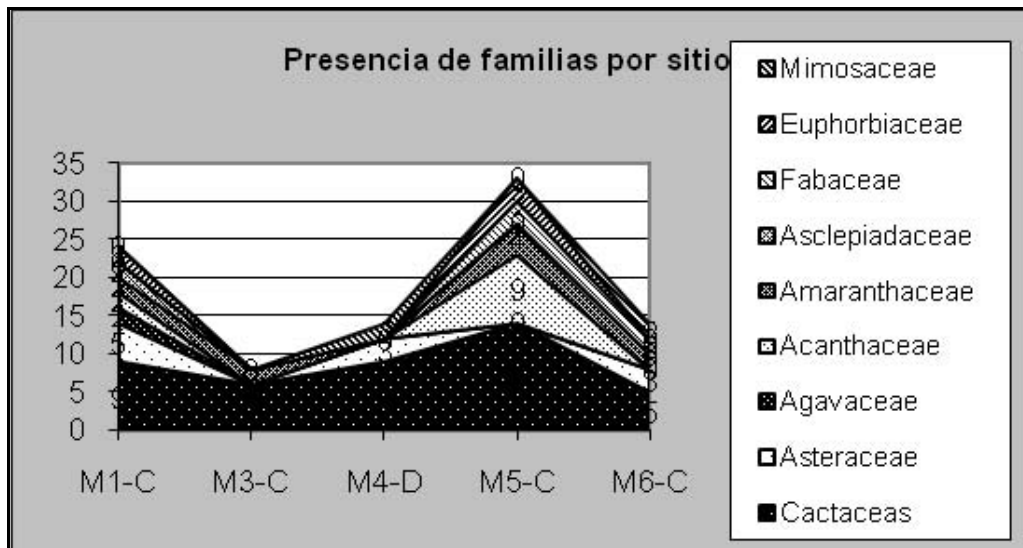


Figura 36. Gráfico que muestra la presencia de las principales familias por sitio

Es importante aclarar que en el análisis que se realizó a partir de las gráficas anteriores, sólo se incluyeron los sitios que presentaban algún tipo de vegetación, los sitios con suelo desnudo al no tener vegetación obviamente no pudieron ser considerados. También cabe señalar que la vegetación de la terraza **D** presenta un patrón de distribución muy fragmentado, presentándose en parches aislados interrumpidos por áreas agrícolas, barrancos y áreas con suelo desnudo (Fig. 37). En cambio la vegetación de la terraza **A** está más conservada y menos fragmentada, esta vegetación se alterna con áreas de cultivo y granjas avícolas (Fig. 38).



Figura 37. Distribución de la vegetación en la terraza **D** (Nov-04).

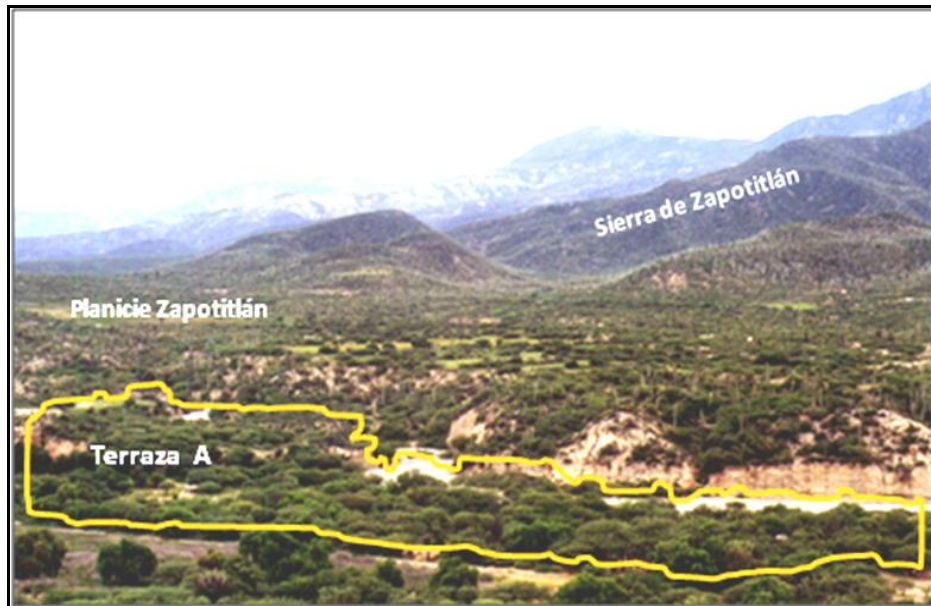


Figura 38. Condición de la cobertura vegetal en la terraza **A** (Mar-04)

IX CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en cuatro años de monitoreo, se puede afirmar que sólo el limo mostró variación estadísticamente significativa con respecto al tiempo (mes y año de muestreo). Este resultado puede interpretarse en el sentido de que cuatro años de investigación no fueron suficientes para registrar la influencia del tiempo sobre las propiedades ya que como lo señalan algunos autores (IUGS 2001, Dale & Beyeler 2001), que para monitorear el suelo y poder visualizar algún cambio o tendencia, se recomienda tener registros de cuando menos diez años; otra posible explicación es que los procesos de cambio en los suelos se están dando a un ritmo "lento", lo que significaría que los suelos de las terrazas son relativamente estables en la actualidad. Los otros dos factores que se compararon: tipo de suelo (terraceza **A** y terraceza **D**) y condición de suelo (desnudo, protegido y agrícola), si tienen un efecto más notorio sobre la variación de las propiedades estudiadas ya que presentan diferencias estadísticas significativas. Los sitios protegidos por la vegetación, tienen una mejor calidad de suelo con respecto a los sitios con suelo desnudo y terrenos agrícolas. También se observa que no existe interacción entre los tres factores estudiados en la investigación, sino que cada uno de ellos actúa de manera independiente, esto significa que no hay sinergismo o combinación de factores.

Los resultados obtenidos, el análisis de los indicadores edáficos (propiedades del suelo), análisis estadístico y comportamiento de la vegetación, muestran que sólo en la terraceza **D** se presente problemas severos de degradación del suelo. Consideramos que la degradación del suelo y de la terraceza misma forma parte de un proceso de desertificación que está ocurriendo en el área de estudio. Existen elementos que indican que la degradación ambiental de la terraceza **D** es parte de un fenómeno de desertificación que ha provocado la pérdida del potencial productivo de las tierras consecuencia del mal manejo y el abuso que durante mucho tiempo se ha hecho de ellas, esta conclusión se fundamenta en los resultados obtenidos y en lo establecido en la base teórica formulada por diversos autores y presentados en el capítulo IV del presente trabajo.

Existen evidencias arqueológicas presentadas por autores como Byers (1967) y McAuliffe *et. al.* (2001), que demuestran que el área de estudio ha sido poblada desde hace más de mil años por grupos humanos dedicados a la agricultura. Dado que los suelos de las terrazas eran los más idóneos para la actividad agrícola por ser profundos, fértiles, con un relieve plano y buenas reservas de agua, es muy probable que fueran seleccionados para establecer ahí sistemas agrícolas, que evidentemente no recibieron un manejo adecuado y fueron sobre-explotados; si a la actividad agrícola se le suma el impacto de la ganadería, donde la cría de ganado caprino también se remonta a bastante tiempo atrás, entonces se puede entender que la capacidad de carga y de resiliencia del sistema natural fue rebasada, provocando con esto la degradación de la tierra. Con base en el análisis de los resultados obtenidos y a manera de hipótesis, consideramos que el gatillo que disparó la degradación del suelo de la terraceza **D** fue el cambio de uso del suelo donde se eliminó la vegetación natural para introducir cultivos. Está documentado por McAuliffe

et. al. (2001) que aproximadamente hace 940 años hubo una gran expansión de la agricultura en la región, lo que propició una gran erosión (esta información se obtuvo del análisis estratigráfico de la terraza y de la datación que se hizo).

Por otra parte, los resultados obtenidos demuestran que el tipo de suelo sí es un factor de predisposición importante a la degradación (al respecto cabe comentar que la variación del suelo es un tópico poco abordado en investigación que tratan el tema de la degradación ambiental). Es muy claro que los suelos arcillo limosos de la terraza **D** fueron más susceptibles a la degradación física por sellado y encostramiento que los suelos arenosos de la terraza **A**, donde las áreas degradadas son mínimas en comparación con las de la **D**.

De acuerdo a los resultados obtenidos y haciendo un planteamiento hipotético de cómo se han degradado las terrazas y el por qué la terraza **D** está más degradada que la **A**, se llega a la conclusión que la materia orgánica es el factor que marca la diferencia entre la calidad del suelo de los sitios conservados y los degradados. La reducción de la materia orgánica afecta directamente a la estructura del suelo disminuyendo la estabilidad de los agregados. Al eliminarse los residuos orgánicos, el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo desnudo produce la rotura de los agregados y la separación de las partículas. Esto es más grave cuando el suelo presenta elevados contenidos de limo como es el caso de la terraza **D**; no hay que olvidar que los suelos limosos presentan un riesgo potencial natural a la degradación física por encostramiento y sellado (Le HoueÂrou 2002 y Michelena *et al.* 2002). Al desintegrarse los agregados las partículas finas van obturando los poros de la superficie del suelo y forman un sello (Fig. 17 y Fig. 20), esto reduce de manera considerable la infiltración, aumentando el escurrimiento y la erosión, propiciando la fragmentación de la terraza. Aunque las costras formadas en este proceso suelen ser muy frágiles, las plántulas no tienen suficiente fuerza para romperlas, incluso cuando la costra se produce después de la germinación, la cohesión es tan alta que puede llegar a estrangular a las pequeñas plántulas (Voorhes *et al.* 1978), por esta razón en los suelos desnudos no pueden crecer las plantas. Una vez que la costra o sello se establece, el suelo desnudo es invadido por costras microbióticas (Fig. 33), limitando aun más la entrada de agua aumentando así las condiciones de aridez, esto concuerda con lo que reporta Le HoueÂrou 2002 cuando describe el fenómeno de la desertización. La baja infiltración y la elevada escorrentía desencadenan una erosión intensa que da lugar a la formación de pequeños canales, mismos que se concentran, profundizan y ensanchan para formar cárcavas y que continúan creciendo hasta formar barrancos, dando como resultado la fragmentación de la terraza y la formación de un sin número de fragmentos (“islas”) de distintas formas y tamaños (Fig.5). Esta secuencia hipotética que aquí se plantea, se ajusta casi perfectamente con lo que diversos autores como Dregne (2002), Le HoueÂrou (2002), Stocking & Murnaghan (2003), UNEP (1995) y Verstraete (1986) establecen como la secuencia que se da cuando la desertificación y la desertización tiene lugar en una región árida o semiárida (véase pag. 11).

Por otra parte, los sitios protegidos con vegetación permiten una tasa de infiltración mayor lo que determina un escurrimiento menor y menos movimiento horizontal de

partículas. En contraste los sitios con suelo desnudo, presentan problemas de degradación física por sellamiento y encostramiento, producido principalmente por el movimiento del limo.

De acuerdo a lo anterior si se quiere restaurar los sitios degradados de la terraza **D**, las principales medidas que se deben de tomar en cuenta son aquellas enfocadas a evitar el encostramiento y sellado del suelo. Hay que disminuir la destrucción de los agregados superficiales, se tienen que realizar prácticas culturales que permitan la formación de agregados granulares o poliédricos de tamaño pequeño y estables. Esto incrementará la infiltración y disminuirá el escurrimiento reduciendo la erosión. Para lograr esto, lo mejor es mantener por arriba del 2% los niveles de materia orgánica (Arcia-Rodríguez 1994), proteger la superficie del suelo con residuos orgánicos (acolchado) para evitar el impacto directo de las gotas de agua y la destrucción de los agregados. También es importante elevar el contenido de macro-nutrientes ya que en general presentan niveles bajos. También es recomendable introducir sistemas de microcaptación de agua para aumentar las reservas hídricas del suelo.

Por último, para el ambiente estudiado, las propiedades que se recomienda se utilicen como indicadores de la degradación y/o conservación de los suelos estudiados son: la infiltración, materia orgánica, textura (arena, limo y arcilla), pH y contenido de carbonatos.

ANEXO 1

Cuadro A-1. Datos completos por tiempo de los sitios: M1-D, M2-D, M3-D y M4-D, de los distintos parámetros.

Sitio	Año	Mes	Zona	Sitio	Arena %	Limo %	Arcilla %	D.A. kg/m ³	Poros %	M.O. %	pH agua	CICT Cmol(+)/kg-1	Ca++ Cmol(+)/kg-1
M1-D	2001	Mar	D	Desnudo	26	54	20	1.14	56.64	2.52	8.49	15.33	16.11
M1-D	2001	Ago	D	Desnudo	22	56	22	1.1	53.27	1.15	7.75	16.42	14.83
M1-D	2001	Nov	D	Desnudo	22	51	27	1.17	49.46	1.73	8.2	15.79	12.24
M1-D	2002	Mar	D	Desnudo	22	55	23	1.09	51.03	2.50	8.15	15.68	15.22
M1-D	2002	Ago	D	Desnudo	30	52	18	1.17	48.53	1.62	7.68	18-90	13.59
M1-D	2002	Nov	D	Desnudo	18	58	24	1.07	56.85	1.64	8.02	17.33	15.33
M1-D	2003	Mar	D	Desnudo	34	44	24	1.11	51.46	2.24	7.43	18.22	15.10
M1-D	2003	Ago	D	Desnudo	20	54	26	1.11	56.50	3.65	7.78	15.48	18.15
M1-D	2003	Nov	D	Desnudo	44	38	18	1.14	48.00	1.74	7.87	17.80	13.04
M1-D	2004	Mar	D	Desnudo	26	52	22	1.15	55.55	1.83	8.23	16.12	13.94
M1-D	2004	Ago	D	Desnudo	20	56	24	1.65	52.08	2.21	7.87	21.73	19.50
M1-D	2004	Nov	D	Desnudo	22	56	22	1.2	50.23	2.58	7.90	15.18	17.52
M2-D	2003	Ago	D	Desnudo	18	44	38	1.12	51.40	2.72	8.45	21.20	17.38
M2-D	2004	Mar	D	Desnudo	16	50	34	1.04	56.10	3.20	8.55	22.01	16.17
M2-D	2004	Ago	D	Desnudo	20	50	30	1.17	54.70	4.54	8.13	18.89	16.23
M2-D	2004	Nov	D	Desnudo	18	44	38	1.11	50.65	3.37	7.97	21.95	20.82
M3-D	2001	Mar	D	Desnudo	32	52	16	0.96	54.46	3.45	7.53	18.91	15.15
M3-D	2001	Ago	D	Desnudo	30	53	17	0.94	56.86	5.12	7.62	20.48	17.49
M3-D	2001	Nov	D	Desnudo	28	52	20	0.92	56.79	6.90	7.45	22.94	17.54
M3-D	2002	Mar	D	Desnudo	26	50	24	0.96	55.31	6.68	7.85	23.51	15.66
M3-D	2002	Ago	D	Desnudo	30	54	16	1.05	55.37	4.04	7.83	18.75	16.11
M3-D	2002	Nov	D	Desnudo	22	57	21	0.99	53.30	4.56	8.07	24.25	19.77
M3-D	2003	Mar	D	Desnudo	36	46	18	0.84	57.49	6.19	7.91	22.83	15.60
M3-D	2003	Ago	D	Desnudo	26	52	22	0.95	57.80	4.34	7.86	22.48	18.70
M3-D	2003	Nov	D	Desnudo	28	48	24	1.03	55.10	5.23	7.78	18.68	15.24
M3-D	2004	Mar	D	Desnudo	26	52	22	1.05	54.62	4.71	7.94	20.48	17.01
M3-D	2004	Ago	D	Desnudo	26	54	20	0.93	54.01	2.37	8.08	21.41	18.02
M3-D	2004	Nov	D	Desnudo	26	54	20	1.01	52.52	3.54	7.94	25.18	15.46
M4-D	2001	Mar	D	Desnudo	18	56	26	1.16	50.47	2.43	7.92	16.13	12.53
M4-D	2001	Ago	D	Desnudo	20	55	25	1.14	52.60	1.48	7.88	16.87	13.57
M4-D	2001	Nov	D	Desnudo	18	56	26	1.13	52.74	1.73	7.9	17.16	16.52
M4-D	2002	Mar	D	Desnudo	20	52	28	1.18	53.57	2.52	8.71	18.22	14.22
M4-D	2002	Ago	D	Desnudo	20	56	24	1.12	52.12	1.55	8.02	20.29	18.89
M4-D	2002	Nov	D	Desnudo	26	54	20	1.16	51.05	1.23	8.58	19.30	17.11
M4-D	2003	Mar	D	Desnudo	16	55	29	1.12	55.48	1.73	8.39	15.79	11.70
M4-D	2003	Nov	D	Desnudo	21	53	26	1.12	54.50	1.28	8.44	15.55	11.57
M4-D	2004	Mar	D	Desnudo	16	56	28	1.14	50.48	1.36	8.76	17.37	17.95
M4-D	2004	Ago	D	Desnudo	26	54	28	1.18	44.50	1.34	8.44	16.11	13.66
M4-D	2004	Nov	D	Desnudo	20	50	30	1.13	53.27	2.51	8.66	18.57	17.42

DA= densidad aparente, MO = materia orgánica, CICT = capacidad de intercambio catiónico total

Cuadro A-2. Continuación del cuadro anterior, parámetros restantes

Clave	año	mes	Zona	Sitio	K+ Cmol(+)-kg-1	Nt %	PO ₄ ppm	CO ₃ %	C.E. dSiems	Infiltra cm/hr	Tensión Cbares	Compacta %	C. Campo %
M1-D	2001	Mar	D	Desnudo	0.51	0.166	49.55	23.70	0.76	42	41	57.24	25.40
M1-D	2001	Ago	D	Desnudo	1.76	0.126	50.74	20.15	0.55	54	30	48.13	34.74
M1-D	2001	Nov	D	Desnudo	2.05	0.092	62.00	19.31	1.01	40	34	59.72	36.34
M1-D	2002	Mar	D	Desnudo	1.95	0.094	60.25	17.85	1.02	31	44	55.65	23.38
M1-D	2002	Ago	D	Desnudo	0.32	0.110	71.00	31.72	0.75	32	42	35.48	37.23
M1-D	2002	Nov	D	Desnudo	0.83	0.120	44.50	22.50	3.17	58	28	49.37	25.64
M1-D	2003	Mar	D	Desnudo	2.73	0.160	77.00	17.14	2.05	24	40	61.93	26.13
M1-D	2003	Ago	D	Desnudo	1.56	0.150	62.00	24.31	11.23	28	44	36.97	46.98
M1-D	2003	Nov	D	Desnudo	0.82	0.120	48.00	20.00	4.49	45	42	37.31	44.50
M1-D	2004	Mar	D	Desnudo	0.79	0.099	48.50	21.80	4.09	50	42	31.20	58.76
M1-D	2004	Ago	D	Desnudo	0.66	0.084	1.00	20.97	4.65	54	35	20	44.84
M1-D	2004	Nov	D	Desnudo	0.40	0.117	5.50	20.00	8.37	53	38	41.8	37.47
M2-D	2003	Ago	D	Desnudo	1.51	0.147	60.00	28.20	1.99	70	44	15.55	49.74
M2-D	2004	Mar	D	Desnudo	1.15	0.150	52.00	32.22	1.69	35	36	7.62	56.60
M2-D	2004	Ago	D	Desnudo	1.53	0.178	1.00	28.39	1.00	55	30	73.4	46.95
M2-D	2004	Nov	D	Desnudo	1.38	0.231	8.00	31.00	0.90	43	30	68.6	47.57
M3-D	2001	Mar	D	Desnudo	3.16	0.269	39.03	18.70	2.35	85	37	51.00	40.70
M3-D	2001	Ago	D	Desnudo	2.47	0.298	47.33	13.21	0.93	109	31	62.28	34.18
M3-D	2001	Nov	D	Desnudo	3.25	0.359	59.50	12.41	0.97	138	36	58.44	43.37
M3-D	2002	Mar	D	Desnudo	1.32	0.227	69.00	16.78	0.85	44	28	57.40	36.21
M3-D	2002	Ago	D	Desnudo	0.40	0.154	62.50	19.31	0.77	96	36	41.83	42.60
M3-D	2002	Nov	D	Desnudo	2.82	0.277	55.00	12.85	0.90	144	18	49.14	38.59
M3-D	2003	Mar	D	Desnudo	2.92	0.217	78.00	11.07	1.32	70	30	63.44	35.66
M3-D	2003	Ago	D	Desnudo	0.69	0.284	59.00	17.05	10.21	174	28	40.06	55.70
M3-D	2003	Nov	D	Desnudo	1.62	0.125	47.00	20.90	13.27	108	40	36.35	41.28
M3-D	2004	Mar	D	Desnudo	0.48	0.270	56.00	19.30	10.39	267	34	53.44	53.55
M3-D	2004	Ago	D	Desnudo	0.41	0.244	8.00	10.32	6.00	132	20	36	55.25
M3-D	2004	Nov	D	Desnudo	0.37	0.322	8.00	11.33	7.20	164	20	42.1	49.39
M4-D	2001	Mar	D	Desnudo	1.56	0.137	39.03	27.30	0.41	49	57	82.55	20.20
M4-D	2001	Ago	D	Desnudo	1.74	0.043	48.52	23.85	0.79	36	50	75.37	23.81
M4-D	2001	Nov	D	Desnudo	1.13	0.121	60.00	24.48	0.65	57	46	66.46	24.97
M4-D	2002	Mar	D	Desnudo	2.19	0.071	66.00	24.64	4.80	38	60	67.28	18.58
M4-D	2002	Ago	D	Desnudo	0.47	0.054	67.00	21.40	0.77	81	52	70.94	21.76
M4-D	2002	Nov	D	Desnudo	1.24	0.117	47.00	22.14	0.62	56	56	72.50	19.30
M4-D	2003	Mar	D	Desnudo	2.93	0.082	76.00	27.50	0.66	62	53	77.62	22.82
M4-D	2003	Nov	D	Desnudo	0.61	0.208	46.00	25.00	0.71	73	55	84.20	39.39
M4-D	2004	Mar	D	Desnudo	0.45	0.091	46.50	26.30	0.84	66	42	75.59	44.73
M4-D	2004	Ago	D	Desnudo	0.75	0.093	1.00	22.26	1.40	33	42	51.60	46.30
M4-D	2004	Nov	D	Desnudo	0.54	0.183	2.00	24.33	0.61	47	40	48.40	38.84

CE = conductividad eléctrica C. campo= capacidad de campo

Cuadro B-1 Datos completos por tiempo de los sitios: M5-D, M1-C, M2-C y M3-C para los distintos parámetros.

Sitio	Año	Mes	Zona	Sitio	Arena %	Limo %	Arcilla %	D.A. kg/m ³	Poros %	M.O. %	pH agua	CICT Cmol(+)kg-1	Ca++ Cmol(+)kg-1
M5-D	2001	Mar	A	Desnudo	70	20	10	1.31	39.90	2.84	8.35	15.38	11.92
M5-D	2001	Ago	A	Desnudo	68	19	13	1.27	42.31	1.98	7.72	14.82	12.21
M5-D	2001	Nov	A	Desnudo	74	15	11	1.26	47.70	3.79	7.69	15.80	13.67
M5-D	2002	Mar	A	Desnudo	70	18	12	1.28	49.20	1.87	8.58	15.13	13.66
M5-D	2002	Ago	A	Desnudo	66	22	12	1.32	45.81	2.59	7.96	17.50	16.11
M5-D	2002	Nov	A	Desnudo	60	26	14	1.14	50.89	3.42	7.93	21.84	15.55
M5-D	2003	Mar	A	Desnudo	70	18	12	1.38	49.56	3.40	8.22	20.05	17.90
M5-D	2003	Nov	A	Desnudo	74	16	10	1.25	48.20	2.54	8.44	16.25	10.29
M5-D	2004	Mar	A	Desnudo	66	22	12	1.37	46.42	2.38	8.58	16.48	13.46
M5-D	2004	Ago	A	Desnudo	66	22	12	1.34	43.22	4.33	8.25	16.85	13.76
M5-D	2004	Nov	A	Desnudo	68	20	12	1.28	48.97	2.98	8.15	18.90	17.22
M1-C	2001	Mar	D	Protegido	44	40	16	1.01	53.46	8.53	7.67	22.27	15.95
M1-C	2001	Ago	D	Protegido	47	35	18	0.74	55.28	7.56	7.56	28.15	24.25
M1-C	2001	Nov	D	Protegido	46	42	12	0.81	56.31	5.18	7.35	27.67	15.81
M1-C	2002	Mar	D	Protegido	40	44	14	0.94	54.44	7.64	7.62	27.31	14.77
M1-C	2002	Ago	D	Protegido	52	30	18	0.87	54.14	6.07	7.43	33.36	23.15
M1-C	2002	Nov	D	Protegido	48	40	12	0.79	57.14	14.82	7.71	33.64	20.66
M1-C	2003	Mar	D	Protegido	52	30	18	0.84	57.58	9.13	7.3	30.80	23.40
M1-C	2003	Ago	D	Protegido	56	30	14	0.81	65.60	15.10	7.44	29.58	26.20
M1-C	2003	Nov	D	Protegido	54	32	14	0.86	65.20	16.76	7.59	31.16	15.19
M1-C	2004	Mar	D	Protegido	50	34	16	0.86	57.61	11.14	7.54	31.52	20.00
M1-C	2004	Ago	D	Protegido	56	26	18	0.93	50.35	9.14	7.55	27.83	21.88
M1-C	2004	Nov	D	Protegido	48	35	17	1.04	50.43	6.67	7.83	24.27	17.74
M2-C	2003	Ago	D	Protegido	54	26	20	0.75	64.90	14.47	7.72	36.29	32.64
M2-C	2003	Nov	D	Protegido	62	19	19	0.89	56.60	7.58	8.12	26.71	22.92
M2-C	2004	Mar	D	Protegido	50	26	24	0.88	56.39	11.50	7.82	33.95	27.20
M2-C	2004	Ago	D	Protegido	48	30	22	0.84	56.38	10.22	7.34	27.90	21.68
M2-C	2004	Nov	D	Protegido	36	34	30	0.86	57.19	9.57	7.41	31.05	22.48
M3-C	2001	Mar	D	Protegido	32	52	16	0.9	57.46	3.45	7.53	20.91	17.15
M3-C	2001	Ago	D	Protegido	30	53	17	0.92	58.86	5.12	7.52	22.48	19.49
M3-C	2001	Nov	D	Protegido	28	52	20	0.9	57.79	6.90	7.45	24.94	19.54
M3-C	2002	Mar	D	Protegido	26	50	24	0.96	58.31	6.68	7.65	25.51	17.66
M3-C	2002	Ago	D	Protegido	30	54	16	0.94	59.37	4.04	7.63	20.75	18.11
M3-C	2002	Nov	D	Protegido	28	52	20	0.95	60.41	5.62	7.99	24.85	22.10
M3-C	2003	Mar	D	Protegido	36	40	24	0.83	61.20	7.35	7.69	30.54	22.20
M3-C	2003	Ago	D	Protegido	36	46	18	0.89	41.70	15.00	7.98	25.72	18.00
M3-C	2003	Nov	D	Protegido	34	46	20	0.72	70.00	13.35	7.06	28.40	22.42
M3-C	2004	Mar	D	Protegido	40	44	16	0.84	58.68	11.98	7.72	30.11	16.45
M3-C	2004	Ago	D	Protegido	42	40	18	0.97	45.37	8.90	7.60	23.76	19.51
M3-C	2004	Nov	D	Protegido	42	38	20	0.96	55.61	8.97	7.30	27.53	21.45

DA= densidad aparente, MO = materia orgánica, CICT = capacidad de intercambio catiónico total

Cuadro B-2 Continuación del cuadro anterior, parámetros restantes

Clave	año	mes	Zona	Sitio	K+ Cmol(+)/kg-1	N t %	PO ₄ ppm	CO ₃ %	C.E dSiems	Infiltra cm/hr	Tensión Cbares	Compacta %	C. Campo %
M5-D	2001	Mar	A	Desnudo	2.11	0.065	38.50	5.00	0.78	427	32	58.10	44.77
M5-D	2001	Ago	A	Desnudo	0.88	0.081	52.17	8.49	0.69	351	28	57.75	50.16
M5-D	2001	Nov	A	Desnudo	2.52	0.210	65.00	10.31	0.63	203	34	65.88	39.26
M5-D	2002	Mar	A	Desnudo	3.58	0.075	65.75	10.71	0.73	230	40	61.15	46.80
M5-D	2002	Ago	A	Desnudo	0.96	0.055	72.00	6.21	0.80	435	37	64.02	55.33
M5-D	2002	Nov	A	Desnudo	0.71	0.102	50.00	13.21	0.69	237	22	53.44	47.42
M5-D	2003	Mar	A	Desnudo	2.88	0.144	78.00	9.63	0.74	180	39	76.38	45.82
M5-D	2003	Nov	A	Desnudo	0.93	0.135	53.00	11.00	0.69	160	40	77.99	38.76
M5-D	2004	Mar	A	Desnudo	0.54	0.135	54.00	7.78	0.80	340	30	65.78	40.92
M5-D	2004	Ago	A	Desnudo	1.08	0.147	5.00	9.68	0.88	258	36	50.6	32.45
M5-D	2004	Nov	A	Desnudo	0.68	0.168	6.00	6.00	1.23	210	33	28.2	42.78
M1-C	2001	Mar	D	Protegido	5.43	0.581	36.39	14.00	1.28	519	56	63.36	60.15
M1-C	2001	Ago	D	Protegido	2.13	0.473	48.68	20.33	1.33	576	38	50.41	55.68
M1-C	2001	Nov	D	Protegido	4.50	0.513	62.50	14.82	1.27	497	20	72.52	40.21
M1-C	2002	Mar	D	Protegido	4.34	0.299	68.75	18.57	1.60	242	44	65.42	47.95
M1-C	2002	Ago	D	Protegido	0.81	0.386	74.50	22.07	1.49	843	28	48.36	66.47
M1-C	2002	Nov	D	Protegido	1.43	0.822	50.00	22.50	1.36	742	32	60.77	71.49
M1-C	2003	Mar	D	Protegido	3.46	0.480	76.00	14.29	1.76	583	45	31.81	65.12
M1-C	2003	Ago	D	Protegido	1.90	0.490	60.00	17.64	1.53	600	60	34.72	72.33
M1-C	2003	Nov	D	Protegido	1.70	0.608	60.00	15.00	1.55	550	30	88.67	85.90
M1-C	2004	Mar	D	Protegido	1.09	0.666	63.50	17.04	2.26	510	31	44.10	56.61
M1-C	2004	Ago	D	Protegido	1.08	0.338	10.00	16.13	1.62	620	28	18.8	71.60
M1-C	2004	Nov	D	Protegido	0.52	0.317	1.00	18.67	1.58	560	28	42.1	74.51
M2-C	2003	Ago	D	Protegido	2.78	0.595	59.00	19.60	2.65	614	38	10.55	66.13
M2-C	2003	Nov	D	Protegido	3.43	0.462	52.00	24.30	1.04	481	32	14.00	64.18
M2-C	2004	Mar	D	Protegido	1.43	0.488	62.00	19.26	2.51	864	34	18.66	54.80
M2-C	2004	Ago	D	Protegido	2.11	0.571	5.00	20.65	1.30	729	32	43.9	75.03
M2-C	2004	Nov	D	Protegido	1.94	0.604	22.75	23.67	1.80	577	32	34	72.08
M3-C	2001	Mar	D	Protegido	3.16	0.269	35.03	15.70	3.52	185	30	40.00	75.14
M3-C	2001	Ago	D	Protegido	2.47	0.298	40.33	13.21	0.95	179	35	49.14	62.33
M3-C	2001	Nov	D	Protegido	2.25	0.359	59.50	11.41	1.13	158	40	53.43	57.96
M3-C	2002	Mar	D	Protegido	1.32	0.227	69.00	6.78	1.23	144	29	42.74	63.41
M3-C	2002	Ago	D	Protegido	0.40	0.154	59.50	9.31	2.77	196	33	38.45	70.98
M3-C	2002	Nov	D	Protegido	0.28	0.428	64.00	12.86	3.62	172	28	45.77	58.75
M3-C	2003	Mar	D	Protegido	2.68	0.378	77.00	7.50	0.66	590	36	57.40	64.51
M3-C	2003	Ago	D	Protegido	0.96	0.440	62.50	12.30	2.50	584	38	37.83	67.52
M3-C	2003	Nov	D	Protegido	1.35	0.713	50.00	5.90	1.46	267	33	47.86	64.99
M3-C	2004	Mar	D	Protegido	0.73	0.454	44.50	7.78	2.17	347	32	42.35	49.65
M3-C	2004	Ago	D	Protegido	0.85	0.437	10.00	6.45	3.20	415	32	30.8	58.52
M3-C	2004	Nov	D	Protegido	0.70	0.616	13.00	6.33	2.25	350	24	27.3	70.98

CE = conductividad eléctrica C. campo= capacidad de campo

Cuadro C-1 Datos completos por tiempo de los sitios: M5-C, M6-C y M2-TA de los distintos parámetros.

Sitio	Año	Mes	Zona	Sitio	Arena %	Limo %	Arcilla %	D. A. kg/m ³	Poros %	M.O. %	pH agua	CICT Cmol(+)-kg-1	Ca++ Cmol(+)-kg-1
M5-C	2001	Mar	A	Protegido	78	15	7	1.2	49.20	4.44	7.8	20.36	10.30
M5-C	2001	Ago	A	Protegido	72	18	10	1.14	53.62	5.14	7.64	19.63	15.67
M5-C	2001	Nov	A	Protegido	72	17	11	1.12	52.10	5.00	7.43	21.19	13.16
M5-C	2002	Mar	A	Protegido	70	18	12	1.16	51.50	4.09	8.11	18.32	16.11
M5-C	2002	Ago	A	Protegido	74	17	9	1.18	50.22	4.63	7.79	22.04	14.82
M5-C	2002	Nov	A	Protegido	74	17	9	1.15	51.27	3.69	8.1	18.79	11.11
M5-C	2003	Mar	A	Protegido	70	18	12	1.17	51.77	6.37	7.83	20.95	16.70
M5-C	2003	Nov	A	Protegido	64	28	8	1.11	53.20	3.07	7.8	22.35	12.74
M5-C	2004	Mar	A	Protegido	68	20	12	1.17	52.36	4.76	8.11	19.92	12.53
M5-C	2004	Ago	A	Protegido	72	18	10	1.16	50.95	5.12	7.79	19.59	17.72
M5-C	2004	Nov	A	Protegido	72	18	10	1.18	51.53	3.53	8.19	20.32	14.23
M6-C	2001	Mar	A	Protegido	75	16	9	1.05	54.91	4.57	7.79	24.38	20.38
M6-C	2001	Ago	A	Protegido	68	20	12	1.06	53.74	3.72	7.58	18.73	15.18
M6-C	2001	Nov	A	Protegido	77	14	9	1.09	55.20	3.11	7.92	24.46	24.46
M6-C	2002	Mar	A	Protegido	74	18	8	1.14	55.40	2.93	8.24	19.45	19.45
M6-C	2002	Ago	A	Protegido	72	18	10	1.09	53.15	4.03	7.46	24.40	24.40
M6-C	2002	Nov	A	Protegido	64	28	8	1.05	56.92	2.77	7.57	25.84	25.84
M6-C	2003	Mar	A	Protegido	72	21	7	1.07	54.83	4.78	7.81	17.01	14.20
M6-C	2004	Mar	A	Protegido	76	16	8	1.06	54.57	2.11	8.16	20.36	13.27
M6-C	2004	Ago	A	Protegido	80	12	8	1.05	59.53	5.12	8.07	24.29	14.75
M6-C	2004	Nov	A	Protegido	80	12	8	1.33	47.56	2.98	8.53	16.73	13.81
M2-TA	2003	Ago	D	Agrícola	14	46	40	1.15	55.10	2.90	8.54	19.56	16.70
M2-TA	2003	Nov	D	Agrícola	24	42	34	1.16	49.60	1.43	8.36	21.46	19.61
M2-TA	2004	Mar	D	Agrícola	20	44	36	1.12	55.09	3.04	8.46	24.83	17.20
M2-TA	2004	Ago	D	Agrícola	18	54	36	1.18	49.81	3.94	8.18	19.70	17.12
M2-TA	2004	Nov	D	Agrícola	12	48	40	1.12	48.95	2.07	8.01	20.37	20.62
M1-TA	2003	Mar	D	Agrícola	19	55	26	1.09	52.53	2.10	7.53	20.66	19.40
M2-TA	2003	Mar	A	Agrícola	40	36	24	1.23	50.64	1.74	7.85	24.34	18.80

DA= densidad aparente, MO = materia orgánica, CICT = capacidad de intercambio catiónico total

Cuadro C-1 Continuación del cuadro anterior, parámetros restantes

Clave	año	mes	Zona	Sitio	K+ Cmol(+)/kg-1	N t %	PO ₄ ppm	CO ₃ %	C.E dSiems	Infiltra cm/hr	Tensión Cbares	Compacta %	C. Campo %
M5-C	2001	Mar	A	Protegido	4.63	0.224	39.03	1.94	1.46	568	28	53.72	19.86
M5-C	2001	Ago	A	Protegido	3.43	0.315	51.00	2.74	0.93	737	25	48.27	21.30
M5-C	2001	Nov	A	Protegido	5.06	0.383	62.00	3.45	0.80	717	26	51.35	20.88
M5-C	2002	Mar	A	Protegido	5.92	0.147	64.75	8.21	0.82	680	32	67.09	18.96
M5-C	2002	Ago	A	Protegido	1.03	0.142	70.50	1.38	0.75	320	26	49.54	22.55
M5-C	2002	Nov	A	Protegido	3.36	0.257	64.00	0.71	0.80	371	22	81.83	21.44
M5-C	2003	Mar	A	Protegido	3.44	0.170	76.00	7.50	0.97	633	22	54.05	19.96
M5-C	2003	Nov	A	Protegido	0.81	0.189	50.00	7.00	0.91	354	24	68.67	48.43
M5-C	2004	Mar	A	Protegido	0.86	0.245	52.50	4.44	1.28	698	25	59.30	59.82
M5-C	2004	Ago	A	Protegido	0.93	0.227	8.00	6.13	1.20	486	42	32.6	44.70
M5-C	2004	Nov	A	Protegido	0.62	0.220	10.50	4.33	0.90	575	20	30.8	54.87
M6-C	2001	Mar	A	Protegido	1.54	0.124	39.55	14.70	1.05	525	24	52.17	45.27
M6-C	2001	Ago	A	Protegido	2.46	0.194	47.13	8.77	1.25	852	25	67.23	47.79
M6-C	2001	Nov	A	Protegido	1.13	0.163	62.00	10.68	0.98	344	23	49.96	38.21
M6-C	2002	Mar	A	Protegido	2.71	0.115	68.75	7.86	0.84	1090	30	72.76	40-14
M6-C	2002	Ago	A	Protegido	1.10	0.148	65.00	11.53	1.15	419	26	64.61	48.45
M6-C	2002	Nov	A	Protegido	0.72	0.309	44.50	7.85	0.99	868	27	54.96	50.68
M6-C	2003	Mar	A	Protegido	3.80	0.141	75.00	10.00	1.29	1160	22	79.84	44.19
M6-C	2004	Mar	A	Protegido	0.62	0.154	36.00	5.93	1.25	830	18	68.14	59.88
M6-C	2004	Ago	A	Protegido	0.85	0.283	4.00	10.32	0.90	766	24	36.60	43.85
M6-C	2004	Nov	A	Protegido	0.74	0.224	0.50	9.33	0.61	848	24	44.70	45.01
M2-TA	2003	Ago	D	Agrícola	1.20	0.152	60.00	30.20	1.12	35	24	28.78	48.22
M2-TA	2003	Nov	D	Agrícola	1.23	0.124	50.00	29.60	1.12	42	43	49.30	45.70
M2-TA	2004	Mar	D	Agrícola	1.17	0.159	60.00	30.37	1.43	32	21	35.64	59.10
M2-TA	2004	Ago	D	Agrícola	1.02	0.170	1.00	27.10	2.55	28	26	28.00	58.92
M2-TA	2004	Nov	D	Agrícola	0.80	0.242	5.25	30.66	1.25	37	35	32.17	47.27
M1-TA	2003	Mar	D	Agrícola	1.15	0.180	74.00	20.71	3.01	220	35	40.80	47.90
M2-TA	2003	Mar	A	Agrícola	0.55	0.053	78.00	13.21	0.78	150	30	34.73	44.09

CE = conductividad eléctrica C. campo= capacidad de campo

ANEXO 2
LISTADOS FLORÍSTICOS DE LOS SITIOS CONSERVADOS
 Listado florístico del sitio M1-C, terraza D

	GENERO	ESPECIE
1. Malvaceae		
2. Cactaceae	Pachycereus	holianus
3. Asteraceae	Trixis	pringlei
4. Bromeliaceae	Tillandsia	recurvata
5. Asteraceae	Verbesina	sp.
6. Euphorbiaceae	Euphorbia	sp.
7. Ephedraceae	Ephedra	sp.
8. Cactaceae	Opuntia	pilifera
9. Burseraceae	Bursera	sp.
10. Simaroubaceae	Castela	tortuosa
11. Agavaceae	Agave	marmorata
12. Mimosaceae	Proposis	laevigata
13. Rutaceae	Zanthoxylum	liebmannianum
14. Cactaceae	Myrtillocactus	geometrizzans
15. Malpighiaceae	Mascagnia	parvifolia
16. Zygophyllaceae	Morkilia	mexicana
17. Ulmaceae	Celtis	pallida
18. Boraginaceae	Tournefortia	volubilis
19. Acanthaceae	Justicia	mexicana
20. Amaranthaceae	Iresine	sp.
21. Asclepiadaceae	Gonolobus	sp.
22. Cactaceae	Opuntia	leptocaulis
23. Loranthaceae	Phoradendron	californicum
24. Asclepiadaceae		
25. Cactaceae	Ferocactus	recurvus
26. Amaranthaceae	Iresine	calea
27. Fabaceae	Dalea	carthagenensis
28. Rhamnaceae	Ziziphus	amole
29. Asteraceae	Flaveria	trinervia
30. Cactaceae	Stenocereus	stellatus
31. Phytolaccaceae	Rivina	humilis
32. Cactaceae	Ferocactus	robustus
33. Solanaceae	Solanum	madrense????
34. Polemoniaceae	Loeselia	coerulea
35. Crassulaceae	Sedum	sp.
36. Acanthaceae		
37. Asteraceae	Verbesina	neotenorioides
38. Cactaceae	Mammillaria	sphacelata
39. Cactaceae	Mammillaria	carnea
40. Agavaceae	Agave	karwinski
41. Opiliaceae	Agonandra	obtusifolia
42. Asteraceae	Viguiera	dentata
43. Caesalpiniaceae	Cercidium	praecox
44. Sapindaceae	Cardiospermu	halicacabum

Listado Florístico del sitio M5 –C Terraza A

FAMILIA	GENERO	ESPECIE
Cactaceae	Pachycereus	hollianus
Asteraceae	Trixis	pringlei
Bromeliaceae	Tillandsia	recurvata
Asteraceae	Verbesina	sp.
Euphorbiaceae	Euphorbia	sp.
Ephedraceae	Ephedra	sp.
Cactaceae	Opuntia	pilifera
Burseraceae	Bursera	sp.
Simaroubaceae	Castela	tortuosa
Agavaceae	Agave	marmorata
Mimosaceae	Proposis	laevigata
Rutaceae	Zanthoxylum	liebmannianum
Cactaceae	Myrtillocactus	geometrizzans
Malpighiaceae	Mascagnia	parvifolia
Zygophyllaceae	Morkilia	mexicana
Ulmaceae	Celtis	pallida
Boraginaceae	Tournefortia	volubilis
Acanthaceae	Justicia	mexicana
Amaranthaceae	Iresine	sp.
Asclepiadaceae	Gonolobus	sp.
Cactaceae	Opuntia	leptocaulis
Loranthaceae	Phoradendron	californicum
Asclepiadaceae		
Cactaceae	Ferocactus	recurvus
Amaranthaceae	Iresine	calea
Fabaceae	Dalea	carthagenensis
Rhamnaceae	Ziziphus	amole
Asteraceae	Flaveria	trinervia
Cactaceae	Stenocereus	stellatus
Phytolaccaceae	Rivina	humilis
Cactaceae	Ferocactus	robustus
Solanaceae	Solanum	madrense????
Polemoniaceae	Loeselia	coerulea
Crassulaceae	Sedum	sp.
Acanthaceae		
Asteraceae	Verbesina	neotenorioides
Cactaceae	Mammillaria	sphacelata
Cactaceae	Mammillaria	carnea
Agavaceae	Agave	karwinski
Opiliaceae	Agonandra	obtusifolia
Asteraceae	Viguiera	dentata
Caesalpiniaceae	Cercidium	praecox
Sapindaceae	Cardiospermu	halicacabum

Listado florístico del sitio M6-C Terraza A

FAMILIA	GENERO	ESPECIE
Euphorbiaceae	Croton	ciliato-glandulifer
Cactaceae	Myrtillocactus	schenckii
Asteraceae	Trixis	pringlei
Mimosaceae	Prosopis	laevigata
Mimosaceae	Acacia	constricta
Asteraceae	Verbesina	sp.
Boraginaceae	Tournefortia	volubilis
Cactaceae	Opuntia	leptocaulis
Cactaceae	Myrtillocactus	geometrizzans
Ulmaceae	Celtis	pallida
Cactaceae	Pachycereus	hollianus
Caesalpiniaceae	Cercidium	praecox
Convolvulaceae	Ipomoea	sp.
Amaranthaceae	Amaranthus	spinosus
Bromeliaceae	Tillandsia	recurvata
Acanthaceae		
Cactaceae	Opuntia	pilifera
Amaranthaceae	Iresine	calea
Phytolaccaceae	Rivina	humilis
Fabaceae	Piscidia	grandiflora
Poaceae	Rhynchelytrum	repens
Anacardiaceae	Schinus	molle
Verbenaceae	Lantana	camara
Asteraceae	Aster	subulatus
Asteraceae	Viguiera	dentata
Euphorbiaceae	Ricinus	communis
Fabaceae	Crotalaria	incana

Listado florístico del sitio M4-D Terraza D

FAMILIA	GENERO	ESPECIE
Cactaceae	Stenocereus	marginatus
Burseraceae	Bursera	sp.
Cactaceae	Cylindropuntia	rosea
Mimosaceae	Prosopis	laevigata
Cactaceae	Myrtillocactus	geometrizzans
Cactaceae	Pachycereus	hollianus
Cactaceae	Ferocactus	recurvus
Cactaceae	Mammillaria	carnea
Sapindaceae	Cardiospermum	halicacabum
Asteraceae	Viguiera	dentata
Caesalpiniaceae	Cercidium	praecox
Cactaceae	Mammillaria	
Loranthaceae	Phoradendron	californicum
Bromeliaceae	Tillandsia	recurvata
Cactaceae	Opuntia	pilifera
Mimosaceae	Acacia	constricta
Asteraceae	Trixis	pringlei
Cactaceae	Neobuxbaumia	tetetzo
Asteraceae	Parthenium	bipinnatifidum

Listado florístico del sitio M3-C

FAMILIA	GENERO	ESPECIE
Agavaceae	Agave	macroacantha
Mimosaceae	Prosopis	laevigata
Bromeliaceae	Tillandsia	recurvata
Cactaceae	Cylindropuntia	rosea
Cactaceae	Myrtillocactus	geometrizzans
Burseraceae	Bursera	sp.
Cactaceae	Echinocactus	platyacanthus
Cactaceae	Opuntia	pilifera
Cactaceae	Pachycereus	hollianus
Cactaceae	Neobuxbaumia	tetetzo
Caesalpiniaceae	Cercidium	praecox

X BIBLIOGRAFÍA.

- **AG/UNEP** (1987) *Drylands dilemma: a solution to the problem*. Executive report of the drylands project. AGPS. 24 p.
- **Aguilera, H. N.** (1970) *Suelos de las Zonas Áridas de Tehuacan, Puebla y sus relaciones con las cactáceas*. Bol. Soc. Mexicana de Cactología, Serie Cactáceas y Suculentas, Tomo XV **3**, 51-65.
- **Albaladejo, J., M. Martínez, A. Roldan y V. Castillo** (1998) *Soil degradation and desertification induced by vegetation removal in a semiarid environment*. Soil Use and Management **14**, 1-5
- **Alencáster** (1956) *Pelecípodos y Gasterópodos de la región de San Juan Raya, Estado de Puebla*. Paleontología Mexicana. Instituto de Geología UNAM.
- **Arcia-Rodríguez, M.** (1994) *Geografía del medio ambiente: una alternativa del ordenamiento ecológico*. Colección Ciencias y técnicas/24, UAEM. México 289 p.
- **Aveyard, J. M.** (1988). Land degradation: Changing attitudes, Why? Journal of Soil Conservation, New South Wales **44**, 46±51
- **Barceló, D. J.** (1978) *Estratigrafía y Petrografía detallada del área de Tehuacán-San Juan Raya, Edo. de Puebla*. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería. UNAM. México, D.F. p. 143.
- **Belnap, J & O. Lange** (2001) *Biological soil crust: structure, function and management*. Springer. Germany.
- **Berg, W., J. Estrada, J. B. Ortiz, M.V. Camacho, M. E. González y A. T. Valdez** (1999) *La Desertificación en el Altiplano Mexicano*. Número especial de la Revista de la Universidad Autónoma Chapingo, Mexico.
- **Bochet, E., J. L. Rubio and J. Poesen** (1998) *Relative efficiency of three representative scrubland species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate* (Valencia, Spain) Geomorphology **23**, 139-150
- **Brasa, A., F. J. Montero y J. A. Valero** (2001). *El papel de la cubierta vegetal*. En: F. De Santa Olalla. Agricultura y Desertificación. Mundi- Prensa. España. p:165-173.
- **Buitrón, B. E.** (1970) Equinoides del Cretácico Inferior de la Región de San Juan Raya-Zapotitlán, Puebla. Instituto de Geología U.N.A.M. Rev. Paleontología Mexicana. Núm. 30 p.45.
- **Buitrón, B. E. y D. J. Barceló** (1980) *Nerineidos (Mollusca-Gasteropoda) del Cretácico Inferior de la Región de San Juan Raya, Puebla*. Revista del Instituto de Geología U.N.A.M. Vol.4. Núm.1 p. 46-55.
- **Byers, D. S.** (1967) *The Prehistory of the Tehuacán Valley: Environment and Subsistence*. University of Texas Press.
- **Calderón, G. A.** (1956) *Bosquejo Geológico de la Región de San Juan Raya, Puebla*. Congreso Geológico Internacional. México. p. 5 - 41.
- **Caldwell, T. G., E. V. McDonald and M.H. Young** (2006) *Soil disturbance and hydrologic response at the National Training Center, Ft. Irwin, California*. Journal of Arid Environments. **67**, 456-472.
- **Campos, A.** (1992) *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- **Casas, A. y J. Caballero** (1995) *Domesticación de plantas y origen de la agricultura en Mesoamérica*. Ciencias **40**, 36-45.
- **Casas, R. y R. Michelena** (1996) *La degradación de los suelos y la expansión de la frontera agropecuaria en el Parque Chaqueño Occidental*. In: FECIC(ed). *El Deterioro del Ambiente en la Argentina*, pp. 10-24.

- Casas, A., A. Valiente-Banuet, J. L. Viveros, P. Dávila, R. Lira and J. Caballero (2001) *Plant resources of the Tehuacán Valley, México*. *Economic Botany* **55**, 129–166
- Charlton, R. 2007. *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Routledge and the Taylor & Francis Group. London, U.K .
- CONAZA (1993) *Plan de acción para Combatir la Desertificación en México*. Comisión Nacional de Zonas Áridas. Saltillo, México.
- Cox, G.W. (1981). *Laboratory manual of ecology*. William C. Brown Company Publishers. Iowa. U.S. 237 p.
- Dale, V. H. & S. Beyeler (2001) *Challenges in the development and use of ecological indicators*. *Ecological indicators* **I**, 3-10.
- Dávila, P., J.L. Villaseñor, R. Medina, A. Ramírez, A. Salinas, J. Sánchez-Ken y P. Tenorio. (1993) *Listados florísticos de México. Flora el Valle de Tehuacan- Cuicatlán*. Inst. Biol. UNAM. México.
- Dávila, P. (1997) *Tehuacan-Cuicatlan Region, Mexico*. In: Davies S (ed) *Centres of Plant Diversity*. The World Wide Fund for Nature (WWF) and The World Conservation Union (IUCN), pp 139-143.
- Dávila, P., M. C. Arizmendi, A. Valiente-Banuet, J.L. Villaseñor, A. Casas, and R. Lira. (2002) *Biological diversity in the Tehuacan-Cuicatlán Valley, México*. *Biodiversity and Conservation* **11**, 421-442.
- De Pedraza, G. J. (1996) *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Ed. Rueda. Madrid, España.
- Delvin, S. & M. M. Fanning (1989) *Soil: Morphology, Genesis, and Classification*. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Derrau, M. (1965). *Geomorfología*. 1ª.ed. Ariel. Barcelona, España. pp. 65-151
- Derrau, M. (1981) *Geomorfología*. 2ª Ed. Ariel Barcelona Esp.
- Diouf, A. & E. F. Lambin. (2001) *Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal*. *Journal of Arid Environments* **48**, 129-148.
- Dregne, H. E. (2002). *Land Degradation in the Drylands*. *Arid Land Research and Management*, **16**, 99 -132, 34 pp.
- Dumanski, J. & C. Pieri, (1996) *Application of the pressure-state-response framework for the land quality indicators (LQI) programme*. In: *Land Quality Indicators and Their Use in Sustainable Agriculture and Rural Development*. Proceedings of a Workshop, 25-26 January. FAO, Rome.
- Eldridge, D. E. Said & M. Shachak (2000) *Infiltration through three contrasting biological soil crusts in patterned landscapes in the Negev, Israel*. *Catena* **40**, 323-336.
- Evans, R. & J. Johansen (1999) *Microbiotic Crusts and Ecosystem Processes*. *Critical Reviews in Plant Sciences* **18**(2), 183-225.
- FAO, UNEP, UNESCO (1979) *A Provisional Methodology for Soil Degradation Assessment*. FAO, Rome.
- FAO (1980) *Metodología provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma Italia.
- FAO (1984) *Metodología provisional para la evaluación y la representación cartográfica de la desertización*. FAO/PNUMA. Roma Italia. 74 pp.
- FAO-UNESCO (1994) *World Reference Base for Soil Resources*. International Soil Reference and Information Centre. Rome, Italy. 161 pp.
- FAO (1995) *Planning for sustainable use of land resources. Towards a new approach*. Land and Water Bulletin 2. FAO, Rome.
- FAO (1997) *Land quality indicators and their use in Sustainable Agriculture and Rural Development*. Land and Water Bulletin 5. FAO, Rome.

- **FAO** (2000) *Desarrollo sostenible en zonas montañosas*. 26ª Conferencia Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Mérida, México. LARC/00/INF/6.
- **FAO/ISRIC** (2000b) *Soil and Terrain Database, Land Degradation Status and Soil Vulnerability Assessment for Central and Eastern Europe*. FAO's Land and Water Digital Media Series # 10. FAO, Rome.
- **FAO** (2001) *Guidelines for Qualitative Assessment of Land Resources and Degradation*. AGL/Misc33/2001. FAO, Rome.
- **FAO** (2003) *Evaluación de la Degradación de la Tierra en Zonas Áridas (LADA)*. Borrador, Roma. 42 pp.
- **Félix, J. y H. Lenk H.** (1891). Uebersicht uber die geologischen verhältnisse mexicanischen states puebla. *Palaentographica* **37**, (117-139).
- **Fuentes, A. L., R. López y C. Soto Mora** (1971) *Metodología para el análisis Geográfico de la zona de San Juan Raya*. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Vol. IV México.323-368. pp
- **García, A. T. y J. Lugo Hubp.** (2003) *El Relieve Mexicano en mapas topográficos*. Instituto de Geografía. Serie libros, Núm 5. Méx.
- **García, E.** (1973) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía UNAM, México.
- **García, O. F.** (1991) *Influencia de la dinámica del paisaje en la distribución de las comunidades vegetales en la cuenca del río Zapotitlán*. Puebla. Investigaciones Geográficas Boletín. Vol. 23.
- **García, M.G.** (2000) *Estudio de los suelos de las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán, Puebla*. (Tesis de licenciatura) .FES IZTACALA UNAM. Méx. 78 pp.
- **Geissert, D. y J.P. Rosignol** (1987) *La Morfología en la ordenación de los paisajes rurales*. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Xalapa Ver. México.1-9 pp.
- **Gerrad, J.** (1992) *Soil Geomorphology, A Integration of pedology and geomorphology*. Chapman and Hall British London.154-179 pp.
- **Guerra, P. F.** (1980) *Fotogeología*. UNAM. México. 337 pp.
- **Herrick, J. & W. Withford** (1995) *Assessing the quality of rangeland soils: challenges and opportunities*. *Journal of Soil and Water Conservation* **50**, 237-242.
- **Gutiérrez, J.R. y Squeo F.A.** *Importancia de los arbustos leñosos en los ecosistemas semiáridos de Chile*. Ecosistemas (Artículo de Internet) 2004. Disponible en URL:<http://www.aeet.org/ecosistemas/041/investigacion2.htm>.
- **INEGI** (1984) *Carta topográfica Tehuacán*. E14B57. Esc. 1: 50,000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- **INE - SEMARNAP** (1997) *Reserva de la Biosfera Tehuacán- Cuicatlán*. Instituto Nacional de Ecología.
- **ISRIC** (1987) *Procedures for Soil Analyses*. Technical Paper No. 9. 2nd Edition. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.
- **ISRI** 1997 " *The Assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation in South and Southeast Asia (ASSOD)*". Ed. By G.W.J. Van Linden & L.R. Oldeman. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen.
- **IUGS** (2001) *Geoindicators: Tools for assessing rapid environmental changes*. (Artículo de Internet) 2001.The U.S. Global Change Research Information Office. Available from: www.gcrio.org/geo/title.html.

- **Jacinto Arias, J. L. y B. W. Estrada** (1990) *Evaluación del riesgo de Degradación de los Suelos en el Estado de Michoacán*. Memorias del XXIII congreso de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Comarca Lagunera, México.
- **Landa, R., J. Meave y J. Carabias** (1997) *Environmental deterioration in rural México: an examination of the concept*. Ecological Society of América, Ecological Applications. **7**(1), 316-329.
- Lavauden, L.** (1927) *Les forets du Sahara*. (In.) Revue des Eaux et Forets. **7**, 329-341.
- Le HoueÀ rou, H. N.** (1968) *La Desertisation du Sahara Septentrional et des steppes limitrophes*. Annales Algeriennes de Geographie **6**, 2± 27.
- Le HoueÀ rou, H. N.** (2002) *Man-Made Deserts: Desertization Processes and Threats*. Arid Land Research and Management Vol **16**, 1- 36.
- **López, G. F., D. Muñoz-Iniestra, M. M. Hernández, A. A. Soler, C. L. Castillo y I. A. Hernández** (2003) *Análisis integral de la toposecuencia y su influencia en la distribución de la vegetación y la degradación del suelo en la Subcuenca de Zapotitlán Salinas, Puebla*. Bol.Soc. Geol. Mexicana, Tomo LVI **1**, 9-41.
- **López-Acevedo, R. M., J. Porta-Casanellas y C. Roquero de Laboro** (2003) *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3ª Edición. Editorial Mundi-Prensa, España. 929 pp.
- **Lozano, F., S. Sánchez, J. Sánchez y F. Pugnaire** (1998) *Water erosion risk in the Natural Park of Cabo de Gata-Níjar*. In: Geoforma (Ed). The soil as a strategic resource: degradation processes and conservation measures. Logroño, Esp. 77-89. pp.
- **Lugo, H. J.** (1986) *Los métodos geomorfológicos*. Rev. Geografía. Inst. Geografía UNAM, Vol:1. No 1. México. 13-26
- **Lugo, H. J.** (1989) *Diccionario Geomorfológico*. UNAM. México. 337 pp.
- **Lugo, H. J.** (1990) *El relieve de la República Mexicana*. Revista del Instituto de Geología, UNAM, México, **9** (1), 82 – 111 pp.
- **Lugo, H. J.** (1991) *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos cartográficos)*. Instituto de Geografía. U.N.A.M. México 109 pp.
- **Lugo, H. J. y C. Córdova** (1992) *Regionalización Geomorfológica de la República Mexicana*. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía Num. 25, México, D. F. 25-41 pp.
- **Maldonado, M.** (1956) *Bosquejo Geológico de la Región San Juan Raya Puebla*. In: Maldonado M. (edit.) Estratigrafía del Mesozoico y Tectónica del Sur del Estado de Puebla: Presa Valsequillo, Sifón de Huexotitlanapa y problemas hidrológicos de Puebla. Congreso Geológico Internacional XX, Libro Guía de la Excursión A-11. UNAM. 9-43 pp.
- **Mateo, R. J. y P.M. Ortiz** (2001) *La degradación de los paisajes como análisis teórico metodológico*. Inst. Geografía UNAM; Serie Varia, **1**, 9-40
- **McAuliffe, R. J., P. C. Sundt, A. Valiente-Baunet, A. Casas and J. Viveros.** (2001) *Pre-columbian soil erosion, persistent ecological changes, and collapse of a subsistence agricultural economy in the semi-arid Tehuacán Valley, México's 'Cradle of Maize'*. Journal of Arid Environments **47**, 47-75.
- **Michelena, R. y Irutia C.** (2002) *Publicaciones del Instituto de Suelos INTA*. Instituto de suelos Cautelar, Buenos Aires, Argentina. 12-45 pp.
- **Montoya-Ayala, R., R. Padilla y C. Stanford** (2003) *Valoración de la calidad y fragilidad visual del paisaje en el valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla (México)*. R. Bol. de la A.G.E. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. UNAM. México. **35**, 123-136.
- Morin, V. C.** (2003) *Estudio florístico de las terrazas aluviales del río Salado en el Valle de Zapotitlán Puebla*. (Tesis Licenciatura Biología), Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM México. 57 pp.

- **Mostafa, K. T., A. Osama, El-kholi, E. El-hinnawi, M.W. Holdgate and D.F. Mcmichael** (1992) *The World Environment 1972-1992: Two Decades of Challenge*. Chapman y Hall. 884 pp.
- **Muñoz, I. D., C. A. Mendoza, G. F. López, A. Soler y M. M. Hernández** (2006) *Manual de métodos de análisis de suelos*. 2ª Edi. FES Iztacala UNAM. 82 pp.
- **Narro, F. E.** (1994). *Física de suelos*. Edi. Trillas. México 195 pp.
- **Ochoa, T. V.** (2001). *Geomorfología, clima y vegetación del valle de Tehuacan Cuicatlán Pue. Oax.* Tesis de Licenciatura Facultad de Ciencias UNAM, México. 88 p.p.
- **Oldeman, L. R.** (1988) *Global assessment of soil degradation (GLASOD): Guidelines for general assessment of the status human-induced soil degradation*. ISRI. Wageningen, The Netherlands. 12 pp.
- **Oliveros, G. O.** (2000) *Descripción estructural de las comunidades vegetales en las Terrazas fluviales del Río Salado en el Valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla, México*. (Tesis de Licenciatura Biología) FES-Iztacala U.N.A.M. México. 84. pp.
- **Paz, M. J., J. Sánchez and F. Visconti** (2006) *Combined use of GIS and environmental indicators for assessment of chemical, physical and biological soil degradation in Spanish Mediterranean Region*. Journal of Environmental Management. **79**, 150 – 162.
- **Plymouth, U. K. & U. Hellden** (1988) *Desertification monitoring: Is the desert encroaching*. Desertification Control Bulletin 17:8±
- **Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero.** 2003. *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. 3º. Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- **PNUMA** (1985) *El estado del medio ambiente: aspectos ambientales de las nuevas tecnologías agrícolas, la población y el medio ambiente*. PNUMA. Nairobi. Kenia.
- **Rivera, V., H. Godínez, I. Manuell y S. Rodríguez** (2005) *Physical effects of biological soil crusts on seed germination of two desert plants under laboratory conditions*. Short communication. *Journal of Arid Environments* **63**, 344–352.
- **Roldan-Parrodi, A. & J. Trueba-Davalos** (1992) *Factores ecológicos y sociales de la desertificación*, in F. Medellín-Leal, ed. *La desertificación en Mexico*. Universidad Autonoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, Mexico. 55±80 pp.
- **Rosgen, D.L.** (1994) *A classification of natural rivers*. *Catena*. **22**, 169 – 199.
- **Rzedowski, J.** (1978) *Vegetación de México*. Ed. Limusa, México.
- **Sandoval, V.M. y B.W. Estrada** (1988) *Evaluación del desertificación en el Municipio Cuauhtémoc, Colima*. Memorias del XXI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Cd. Juárez, Chihuahua. México.
- **Scott, A., W. Gardner and J. Ciolkosz** (1996). *Quaternary terraces of Susquehanna River, Pennsylvania*. Elsevier: *Geomorphology*, 17(1996)273-494 *Ecological Applications*, **7**(1), 316-329.
- **Secretaría de Gobernación** (1988) *Los Municipios de Puebla: Serie, Los municipios de México*. S.G. México.
- **SEDESOL** (1988) *Manual para el ordenamiento ecológico general del territorio nacional*. INE. Méx.
- **SEMARNAP (2002)** *Estadísticas sobre la degradación del suelo en México*. (Artículo de Internet) tomado de www.semarnap.gob.mx/programa2000/documento/capitulo1_1A.htm.
- **SEMARNAT** (2000ª) *Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos*. Diario Oficial de la Federación, Tomo DLXV No. 12
- **SEMARNAT** (2002b) *Informe de la situación del medio ambiente en México*. Compendio de estadísticas ambientales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México
- **SEMARNAT** (2002c) *Inventario Nacional de Suelos I*, a partir de diversas fuentes: CONAZA / SEDESOL, Plan de Acción para Combatir la Desertificación en México, (PACD-México, 1994), México; Diario Oficial de la Federación (D.O.F) del 1 de junio de 1995 (Págs. 5 a la

36); Informes de Semarnat / PNUMA, 1999. SEMARNAT, Colegio de Postgraduados, Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000, México 2001-2002. Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación. Informe de México 2000-2002.

- **Soriano, M., C. Asensio, E. Delgado y F. Lozano** (2000) *Riesgo de degradación física en el término municipal de Pechina (Almería, España)*. Serie Edafología **7**(3), 93-103.
- **Stocking & Murnaghan** (2003) *Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra*. Mundi-Prensa. España.
- **Téllez, V. O. & P. Dávila** (2003) *Protected areas and climate change: A case study of the cacti of the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, México*. Cons. Biol. **17**, 846-853
- **Tricart, J.** (1969). *La epidermis de la tierra*. Nueva colección Labor, 91. Ed Labor Barcelona.
- **Tricart, J. y J. Kilian**, (1982) *La eco-geografía y la ordenación del medio natural*. Ed. Anagrama, Barcelona, Esp.
- **UN-CCD** (2003) *Evaluación de la Degradación de Tierras en Zonas Áridas (LADA)*. Borrador FAO, Roma, Italia 42pp
- **UN-CCD** (2005). *Evaluación de la degradación de tierras en zonas secas*. PNUMA Conferencia de las partes Comité de Ciencia y Tecnología Séptimo período de sesiones Nairobi, 17 pp
- **UNDP** (1998) *Environmental Information Systems in National Action Programmes to Combat Desertification*. United Nations Development Programme N.Y. USA.
- **UNEP** (1982) *A World Soils Policies*. UNEP, Nairobi.
- **UNEP/ISRIC/FAO/ISSS**, (1993) *Global and national soils and terrain databases (SOTER)*. Rev1. World Soil Resources Reports # 74. FAO, Rome.
- **UNEP** (1995) *United Nations Convention to Combat Desertification*. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- **UNEP** (1997) *World Atlas of Desertification (Agenda 21)* United Nations Conference on Environment and Development. United Nations, New York. 2nd ed. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- **UNDP** (1998) *Environmental Information Systems in National Action Programmes to Combat Desertification*. United Nations Development Programme, N.Y. USA. 12 pp.
- **USDA** (1984) *Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples*. Soil Survey Investigation Report No. 1. Soil Conservation Service. Washington, D.C.
- **Valiente-Banuet, A.** (1991) *Patrones de precipitación en el Valle Semiárido de Tehuacán, Puebla*. (Tesis de Licenciatura Biología) Facultad de Ciencias. UNAM.
- **Valiente-Banuet, A. y E. Ezcurra** (1991). *Shade as a cause of the association between the cactus *Neobuxbaumia tetetzo* and the nurse shrub *Mimosa luisana**. *J. of Ecology*. **2**, 11-14
- **Valiente-Banuet, A., J.F. McAuliffe, A. Casas, J.L. Viveros, y P.Sundt** (1992). *Maintenance of Biodiversity in the Tehuacán Valley*. Technical Report. World Wildlife Fund. pp. 1-35
- **Valiente-Banuet, A., A. Casas, A. Alcántara, P. Dávila, N. Flores-Hernández, M.C. Arizmendi, J.L. Villaseñor y J. Ramírez** (2000) *La vegetación del valle de Tehuacán Cuicatlán*. Bol. Soc. Bot. México **67**, 24-74.
- **Verstraete, M. M.** (1986) *Defining desertification: a review*. *Climatic Change*, **9**: 5–18
- **Villaseñor, J. L., P. Dávila y F. Chiang** (1991) *Fitogeografía del Valle de Tehuacán-Cuicatlán*. Bol. Soc. Bot. México **50**, 135-149.
- **Voorhees, W.B., C.G. Senst. and W.W. Nelson** (1978) *Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern Corn Belt*. Soil Science Society of America Journal, Madison **42**, 344-9.

- **White, R.P., D. Tunstall, and N. Henniger** (2002) *An Ecosystem Approach to Drylands: Building Support for New Development Policies*. World Resource Institute. Information Policy Brief.
- **WRB – FAO** (1988) *Soil Map of the world*. Revised Legend. Reprinted with corrections. World Soil Resources Report 60. FAO Rome.
- **Younes, G. A. H. and M. A. Adbel- Hady** (1993) *Assessment of soil degradation processes in the middle part of the Nile-Valley, using GIS and Remote Sensing Techniques*. International Society of Soil Science. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, Mexico, Volume 7b, 217-218 pp.
- **Zinck, J.** (1970) *Aplicación de la geomorfología al levantamiento de suelos en zonas aluviales*. MOP, Venezuela.
- <http://www.fao.org/ag/agl/agll/ada/emailconf.stm>
- <http://www.fao.org/docrep/W4745E/w4745e09.htm>
- <http://www.mundofree.com.cctma>)