



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA**

**“IMPACTO DEL TIPO DE USO Y COBERTURA  
VEGETAL SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO DE  
UNA REGIÓN SEMIÁRIDA DEL ESTADO DE  
PUEBLA, MÉX.”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**BIÓLOGO**

**P R E S E N T A :**

**ALONSO CALDERÓN ALEXIS STEFAN**



**DIRECTOR DE TESIS:  
Dr. Daniel Jesús Muñoz Iniestra**

**Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Edo. de México,  
2019.**



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.

## AGRADECIMIENTOS

*A mis padres Jenni y Javier, por todo el apoyo y comprensión que me han brindado todo este tiempo tanto en mi vida personal como en la académica, por esos desvelos que pasaron estando conmigo, por enseñarme a ser responsable en todo lo que haga, así como a nunca darme por vencido cuando las cosas se empiezan a poner difíciles. Los amo.*

*A mis abuelos (Padre y Mami), les agradezco sus cuidados, por siempre preocuparse por mí y permitirme estar con ustedes. Gracias por todos los consejos y enseñanzas que llevaré conmigo el resto de mi vida.*

*A mis hermanos Keevyn y Ximena por su compañía y su apoyo.*

*A la Biol. Maribel Selene Gálvez Flores, por acompañarme el tiempo que duró este camino, por tu amor, por estar conmigo en las buenas y malas y siempre motivarme a no rendirme cuando todo parecía ir mal. Te agradezco infinitamente ya que te convertiste en esa persona que mi vida necesitaba recordándome quien soy y de lo que soy capaz.*

*Al Dr. Daniel Jesús Muñoz Iniestra, por aceptar dirigir este trabajo siempre confiando en mí, por compartir sus conocimientos conmigo lo cual valoro mucho, por su amistad y por esas gratas conversaciones de nuestro equipo “Los Pumas”.*

*A mis sinodales, la Dra. Leticia Ríos Casanova, la M. en C. Mayra Mónica Hernández Moreno, el M. en C. Francisco López Galindo y la M. en C. Ana Lilia Muñoz Viveros, ya que con sus comentarios y observaciones me ayudaron a mejorar este trabajo, en especial agradezco a la maestra Mayra su asesoramiento en algunas de las pruebas realizadas en el laboratorio.*

*A los grandes amigos que conocí en la carrera Hugo, Katia, Zaory, Lupita, Chucho, Alejandro, Wendy, Lorena y Eileane así como a mis compañeros del laboratorio de Edafología ya que hicieron amenas las horas de clase y trabajo.*

*A la M. en D. Norma del Carmen Cambray Calderón, por ser mi inspiración en la prepa para estudiar Biología.*

*Y finalmente a la Universidad Nacional Autónoma de México que me abrió sus puertas desde el bachillerato en la Escuela Nacional Preparatoria No.3 “Justo Sierra” y posteriormente en la Facultad de Estudios Superiores Iztacala para formarme profesionalmente como biólogo.*

# Contenido

RESUMEN .....	1
I INTRODUCCIÓN .....	2
II MARCO TEÓRICO .....	4
2.1 Calidad del suelo. ....	4
2.1.1 Indicadores de calidad del suelo .....	5
2.2 Cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. ....	7
2.3 Zonas áridas. ....	7
III OBJETIVOS .....	9
3.1 Objetivo general. ....	9
3.2 Objetivos particulares. ....	9
IV ANTECEDENTES.....	10
V MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
5.1 Área de estudio.....	13
5.2 Secuencia metodológica .....	14
5.2.1 Fase I .....	14
5.2.2 Fase II .....	15
5.2.3 Fase III .....	18
5.2.4 Fase IV .....	19
VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	21
6.1 Comportamiento de los indicadores en los distintos sitios evaluados. ....	21
6.1.1 Propiedades físicas .....	24
6.1.2 Propiedades químicas .....	29

6.1.3 Propiedades biológicas.....	30
6.2 Índice de Calidad del suelo .....	33
6.2.1 Subíndices del funcionamiento físico (ICFS) y químico biológico (ICQBS) .....	33
6.2.2 Índice Total de Calidad del Suelo .....	37
VII CONCLUSIONES .....	42
VIII BIBLIOGRAFÍA.....	43



## RESUMEN

La calidad del suelo se define como la capacidad que este elemento natural tiene para funcionar dentro de un ecosistema manteniendo una productividad biológicamente sostenible, este término se puede ligar al concepto de funcionalidad del ecosistema en donde se integran e interconectan los procesos biológicos, químicos y físicos del suelo. Las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas son consideradas como los sitios más afectados por la pérdida de calidad del suelo, principalmente por el cambio de uso; por esta razón es preciso contar con variables que puedan servir para evaluar su condición. Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue demostrar si el tipo de cobertura o uso del terreno afecta la calidad del suelo de una terraza fluvial en una zona semiárida del Valle de Zapotitlán, Puebla; para ello, se seleccionaron 8 sitios con 4 diferentes tipos de coberturas (matorral cerrado, matorral abierto, suelo desnudo y agricultura de temporal) en donde se hicieron 3 pruebas correspondientes a la humedad capilar, profundidad y compactación, además, de cada sitio se tomaron 3 muestras con un barreno cilíndrico, estas se colocaron en bolsas etiquetadas y fueron posteriormente tamizadas con una malla de 2mm para realizar las pruebas de laboratorio. Se pusieron a prueba 16 propiedades indicadoras relacionadas con el funcionamiento físico, químico y biológico del suelo. Los datos obtenidos se analizaron con la prueba ANOVA de un factor indicando que 13 propiedades presentaron diferencias significativas, de las cuales 8 fueron físicas, 2 químicas y 3 biológicas; con estas propiedades indicadoras se calculó un índice de calidad de suelo (ITCS) obtenido a partir de dos subíndices que incluyeron su funcionamiento físico (ICFS), así como el químico-biológico (ICQBS). Los resultados obtenidos del índice aplicado mostraron que los suelos de los sitios MC1 y MC2 fueron los que presentaron una mejor calidad, donde según la escala de valoración aplicada se consideran como suelos de moderada calidad, en contraparte los suelos de los sitios MA1, MA2 y SD1 fueron los que presentaron los valores más bajos del ITCS clasificándose como de muy baja calidad. En este sentido se demostró que la cobertura vegetal y el uso que se le da al terreno tuvo efecto sobre la calidad del suelo de los sitios estudiados en la terraza fluvial del Valle de Zapotitlán.



## I INTRODUCCIÓN

La calidad del suelo se define como la capacidad que este elemento natural tiene para funcionar dentro de un ecosistema manteniendo una productividad biológicamente sostenible (Doran y Parkin, 1994; Villareal-Núñez *et al.*, 2013). En este sentido el suelo realiza diferentes funciones entre las que se encuentran:

- Servir como sostén y sustrato para el crecimiento de las plantas, promoviendo la productividad de forma sostenible.
- Permitir el reciclaje de nutrientes en los ecosistemas.
- Ser un hábitat para muchas especies de organismos.
- Atenuar la actividad contaminante y de favorecer la salud de las plantas y animales (Jiménez y González-Quiñones, 2006).

Es por esta razón en el término de calidad del suelo se puede ligar al concepto de funcionalidad del ecosistema en donde se integran e interconectan los componentes y procesos biológicos, químicos y físicos de un suelo en una situación determinada (Astier-Calderón *et al.*, 2002; Navarrete *et al.*, 2011).

La calidad del suelo es dinámica y puede cambiar en lapsos cortos de tiempo de acuerdo con el uso y con las prácticas de manejo, y para conservarla es necesario implementar prácticas sustentables en el tiempo. Evaluar la calidad del suelo permite entender y revertir el deterioro en su funcionalidad ecosistémica como ocurre por la pérdida de infiltración, compactación de la capa superficial, pérdida de nutrimentos, cambios en el pH, pérdida de materia orgánica y reducción de la actividad biológica (Navarrete *et al.*, 2011).

Por tal motivo, el suelo se convierte en un elemento fundamental para el ecosistema terrestre, siendo un recurso natural irremplazable, base de la producción de los sistemas terrestres y receptor principal de la agresividad climática y humana (Muñoz-Iñiestra, 2008).





Las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas son consideradas como los sitios más afectados por la pérdida de calidad del suelo, principalmente por el cambio de uso, ya que el 45% de los matorrales originales de las zonas secas se han modificado por cobertura antrópica, por otro lado, el crecimiento de la actividad ganadera es considerada la principal causa de alteración en regiones secas y tropicales (SEMARNAT, 2002; Hernández, 2016).

No obstante, la preocupación creciente a cerca de la degradación del suelo, de la disminución en su calidad y su impacto en el bienestar de la humanidad y en la calidad del ambiente, aún no hay criterios universales para evaluar los cambios en su calidad (Arshad y Coen, 1992; Bautista *et al.*, 2004). Por ello es preciso contar con variables que puedan servir para evaluar la condición del suelo. Estas variables se conocen como indicadores ya que representan una condición y muestran información acerca de los cambios o tendencias de esa condición (Dumanski *et al.*, 1998, Bautista *et al.*, 2004), de igual forma estos indicadores permiten conocer si la calidad del suelo mejora, permanece constante o decrece (Ghaemi *et al.*, 2014; Estrada-Herrera *et al.*, 2017).

El mantener constante o mejorar la calidad del suelo puede generar varios beneficios, entre los que se encuentran, una mayor productividad, un mejor aprovechamiento de los nutrientes, mejoramiento en la calidad del agua, así como la reducción de gases de efecto invernadero (Brejda y Moorman, 2001).



## II MARCO TEÓRICO

### 2.1 *Calidad del suelo.*

La calidad y la salud del suelo son conceptos equivalentes, no siempre considerados sinónimos (Doran y Parkin, 1994), y debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo (Carter *et al.*, 1997).

En el pasado este concepto fue equiparado con el de productividad agrícola por la poca diferenciación que se hacía entre tierras y suelo. Tierras de buena calidad eran aquellas que permitían maximizar la producción y minimizar la erosión. El concepto de calidad del suelo ha estado asociado con el de sostenibilidad, pero de acuerdo con diversos autores tiene varias acepciones, para Budd (1992), se refiere al número de individuos que se pueden mantener en un área dada; en cambio para Buol (1995), el uso de suelo se debe basar en la capacidad de éste para proporcionar elementos esenciales, pues estos son finitos y por ende limitan la productividad. Es decir, el concepto de calidad del suelo ha sido relacionado con su capacidad para funcionar e incluye atributos como fertilidad, productividad potencial, sostenibilidad y calidad ambiental. De manera simultánea la calidad del suelo es un instrumento que sirve para comprender la utilidad y salud de este recurso.

De acuerdo con lo anterior, el término calidad del suelo se enfoca en evaluar su funcionamiento natural, reconociendo como funciones esenciales: 1) Promover la productividad del sistema sin modificar el balance de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible), 2) atenuar los contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental), 3) favorecer la salud de las plantas y animales (Doran y Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997). Al desarrollar este concepto, también se ha considerado que el suelo es el substrato básico para las plantas ya que capta, retiene y emite agua; y es un filtro ambiental efectivo (Larson y Pierce, 1991; Buol, 1995). Las definiciones más recientes de calidad del



suelo se basan en su multifuncionalidad y no solo en un uso específico (Singer y Ewing, 2000).

Este concepto integra los componentes y los procesos biológicos, químicos y físicos de un suelo con las funciones específicas que este desarrolla (USDA, 1999) y dado que las funciones del suelo son múltiples, su análisis se debe realizar dentro del marco de atributos que reflejen su capacidad de cumplir dichas funciones.

### 2.1.1 Indicadores de calidad del suelo

Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información relevante. Los indicadores deben ser preferentemente variables cuantitativas, aunque pueden ser cualitativas o nominales o de rango u ordinales, especialmente cuando no hay disponibilidad de información cuantitativa, o el atributo no es cuantificable, o cuando los costos para cuantificar son demasiado elevados. Las principales funciones de los indicadores son: evaluar condiciones o tendencias, comparar transversalmente sitios o situaciones, para evaluar metas y objetivos, proveer información preventiva temprana y anticipar condiciones y tendencias futuras.

Los indicadores deben ser:

- Limitados en número y manejables por diversos tipos de usuarios.
- Sencillos, fáciles de medir, y tener un alto grado de agregación, es decir deben ser propiedades que resuman otras cualidades o propiedades.
- Interdisciplinarios ya que deberán contemplar la mayor diversidad de situaciones por lo cual deben de incluir todo tipo de propiedades de los suelos (físicas, químicas, y biológicas)
- Tener una variación en el tiempo tal que sea posible realizar un seguimiento de estas, asimismo, no deberán poseer una sensibilidad alta a los cambios climáticos y/o ambientales, pero la suficiente como para detectar los



cambios producidos por el uso y manejo de los recursos (Gallopín, 1997; Doran y Parkin, 1996; Doran y Zeiss, 2000).

Se han desarrollado listas de indicadores de uso “universal” pensando en todas las situaciones posibles y todos los suelos posibles (Doran y Parkin, 1994). Por otra parte, se han presentado listas pensadas para situaciones regionales o locales (Brejda *et al.*, 2000; Cantú *et al.*, 2002; Lilburne *et al.*, 2004). Segnestam (2002) señaló la conveniencia de utilizar indicadores locales para evaluar a nivel de escala mayor (regiones, provincias y municipios)

#### Indicadores físicos.

Las características físicas del suelo son una parte necesaria en la evaluación de la calidad de este recurso, ya que no se pueden mejorar fácilmente (Singer y Ewing, 2000). La calidad física del suelo se asocia con el uso eficiente del agua y los nutrientes (Navarro *et al.*, 2008). Esta calidad no se puede medir directamente, pero se infiere a partir de indicadores de calidad estáticos o dinámicos y a partir de la medición de los atributos que están influenciados por el uso y las prácticas de manejo (Carter, 2002; Sánchez- Marañón *et al.*, 2002; Dexter, 2004). La estructura, la densidad aparente, la estabilidad de agregados, la infiltración, la profundidad del suelo superficial, la capacidad de almacenamiento de agua y la conductividad hidráulica saturada son las características físicas del suelo que se han propuesto como indicadores de su calidad.

#### Indicadores químicos.

Los indicadores químicos se refieren a las condiciones de este tipo que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, así como la disponibilidad del agua y nutrientes para las plantas y los microorganismos (SQI, 1996). Entre estos indicadores se encuentran la disponibilidad de nutrimentos, el carbono orgánico total, el carbono orgánico lábil, el pH, la conductividad eléctrica, la capacidad de absorción de fosfatos, la capacidad de intercambio de cationes, los cambios en la materia orgánica, el nitrógeno total y el nitrógeno mineralizable.



Indicadores biológicos.

Los indicadores biológicos integran una gran cantidad de factores que afectan la calidad del suelo como la abundancia y los subproductos de los macroinvertebrados (Karlen *et al.*, 1997). Estos rompen, transportan y mezclan el suelo al construir galerías, nidos, sitios de alimentación (Villani *et al.*, 1999). Incluyen funciones como la tasa de respiración, así como subproductos de los hongos, las tasas de descomposición de los residuos vegetales y el N y el C de la biomasa microbiana (SQI, 1996; Karlen *et al.*, 1997).

## *2.2 Cambio de uso de suelo y cobertura vegetal.*

El cambio de uso del suelo es uno de los temas de mayor interés para las ciencias ambientales, así como para la ecología, constituyendo uno de los factores involucrados en el calentamiento global al alterar los ciclos biogeoquímicos, como el del agua y el del carbono (Diouf y Lambin, 2001). Por otro lado, el cambio de uso de suelo también es una de las principales causas de la disminución de la biodiversidad.

Cuando el suelo pierde su cobertura natural se presentan una serie de cambios que repercuten de manera negativa en la fertilidad y la productividad natural del suelo; lo que sugiere que la cubierta vegetal es necesaria para la conservación de los suelos (Albalalejo *et al.*, 1998). La modificación de la vegetación para introducir cultivos altera el equilibrio natural, deja la superficie del suelo expuesta a los agentes erosivos e interrumpe el aporte de restos vegetales al suelo. Por otra parte, en las tierras secas el abandono agrícola y la falta de prácticas adecuadas de manejo han desencadenado fuertes procesos erosivos, los cuales, junto a la baja fertilidad del suelo por largos periodos de cultivo, impiden la colonización vegetal o hacen que ésta sea muy lenta, lo que acelera la pérdida de suelo durante los primeros años de abandono (Aveyard, 1988; Porta *et al.*, 2003).

## *2.3 Zonas áridas.*

La aridez es una condición física que depende de la interacción de la radiación solar, la temperatura, la precipitación, la dirección, fuerza del viento y la



evapotranspiración (Mosiño, 1983). Es por esto que las zonas áridas y semiáridas son aquellos sitios donde el promedio de lluvias es menor que las pérdidas por humedad por medio de la evaporación y evapotranspiración (FAO, 2004). Por esta razón estos ecosistemas son percibidos como desolados, con bajo potencial de producción (SUMAMAD, 2014).

La Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA, 2016) define como zonas áridas a las superficies en donde las precipitaciones son de 250 mm anuales o menos, y como semiáridas en la que la precipitación fluctúa entre 250 mm y 500 mm; estas zonas se localizan en el norte y en algunas partes del centro de México, abarcando poco más de la mitad del territorio nacional (Rzedowsky, 1978)

En este sentido una región semiárida de gran importancia para el presente estudio es la reserva de la biosfera de Tehuacán- Cuicatlán en donde se encuentra ubicada la cuenca de Zapotitlán, la cual presenta una serie de problemáticas entre las que sobresalen la baja productividad, la desertificación, alteración de los sistemas naturales, así como el desequilibrio en los procesos e interacciones ecológicas. Dentro de los paisajes se encuentran las terrazas aluviales del valle de Zapotitlán Salinas las cuales han sido sometidas a presión por diversas actividades productivas como la agricultura de temporal, la ganadería extensiva y los asentamientos humanos (SEMARNAP, 1999) provocando de este modo una fragmentación de las terrazas debido a un fuerte proceso erosivo (López *et al.*, 2003)



### III OBJETIVOS

#### *3.1 Objetivo general.*

Demostrar si el tipo de cobertura o uso del terreno afecta la calidad del suelo de una terraza fluvial en una zona semiárida del Valle de Zapotitlán, Puebla.

#### *3.2 Objetivos particulares.*

- Seleccionar y probar propiedades del suelo que puedan funcionar como indicadoras de la calidad del suelo.
  
- Construir un índice de calidad del suelo utilizando las mejores propiedades indicadoras.
  
- Evaluar el efecto que tienen las distintas coberturas vegetales o usos del terreno sobre la calidad del suelo, comparando y analizando los valores del índice de calidad.



## IV ANTECEDENTES

- Wilson *et al.* (2000) evaluaron atributos físicos, químicos y biológicos para ser utilizados como indicadores de calidad del suelo en lotes que representan el uso en una zona agrícola-ganadera en la provincia de Entre Ríos, Argentina, encontrando que la agricultura continua provocó un deterioro del suelo, por otro lado, la pastura muestra un proceso de recuperación siendo los atributos del suelo con mayores cambios la estabilidad de agregados y el contenido de materia orgánica.
- Andrews *et al.* (2002) examinaron la eficacia relativa de varios índices de calidad de suelo, utilizando métodos de evaluación en sistemas de producción en el norte de California. Los autores concluyen que los índices son muy valiosos porque proporcionan la información necesaria para la selección de mejores prácticas de manejo de la tierra.
- Cantú *et al.* (2007) desarrollaron y aplicaron un set mínimo de indicadores del estado del suelo para evaluar su calidad en agroecosistemas con Molisoles de bajo a moderado desarrollo. De la experiencia adquirida en esta investigación advierten que los indicadores de la calidad del suelo no son universales, sino que deben ser elegidos en función del tipo de ambiente y suelo de la región de estudio.
- Muñoz-Iniestra *et al.* (2009) compararon y analizaron la dinámica de 16 propiedades en dos clases de suelo aluvial a través del tiempo, contrastando sitios donde el suelo se encuentra protegido por cubierta vegetal y otros donde el suelo se encuentra desnudo. La mayoría de las propiedades no tuvieron diferencias significativas respecto al tiempo, pero se encontró que los sitios protegidos resultaron ser más estables en las propiedades evaluadas.





- Prieto- Méndez *et al.* (2013) establecieron indicadores e índices de calidad para suelos cebaderos del sur de Hidalgo, México los cuales fueron normalizados en una escala de 0 a 1. El ICS encontrado en la región fue de 0.48, valor que estuvo influenciado en los contenidos de Carbono Orgánico del Suelo, modificando principalmente las propiedades físicas del suelo como la estabilidad de agregados, la infiltración y la densidad aparente.
- Moreno *et al.* (2015) realizaron un estudio para conocer como el manejo del suelo influye en su calidad, para esto evaluaron una serie de parámetros físicos, químicos y la respirometría de los organismos presentes en dos suelos cultivados con remolacha y maíz, así como un suelo reforestado en recuperación. La mayoría de los parámetros evaluados presentaron los valores más altos en suelo recuperado seguido por el suelo cultivado con remolacha y por último el cultivado con maíz.
- Aguila *et al.* (2016) evaluaron el efecto del uso agrícola sobre la calidad del suelo con un enfoque de escenarios comparados (ecosistema natural y agroecosistema), encontrando un buen estado físico en ambos suelos, pero diferencias significativas en propiedades como pH, materia orgánica, disponibilidad de P y K, así como en las poblaciones microbianas.
- Hernández (2016) presentó la tesis de licenciatura “Impacto de diferentes coberturas y usos de la tierra, en la calidad del suelo de una zona semiárida”, encontrando que el pastizal inducido y la pacerla agrícola tuvieron una mejor calidad que los matorrales cerrados y abiertos de mezquite.
- Hernández *et al.* (2017) evaluaron las transformaciones en propiedades edafológicas por el cambio de uso de suelos en las partes medias y bajas de la microcuenca Membrillo en Ecuador con bosques primarios y secundarios y plantaciones de cacao, pastizales y cultivos de maíz;



presentando cambios en sus características morfológicas (color, tipo de estructura, espesor de los horizontes A y B), así como pérdidas de carbono orgánico y en la densidad aparente del suelo.

- Muñoz *et al.* (2017); publicó el trabajo titulado “Cambios edáficos en islas de fertilidad y su importancia en el funcionamiento de un ecosistema del valle de Tehuacán Puebla, México”, investigación en la que aplicaron un índice de calidad del suelo para comparar las características del suelo dentro y fuera de las islas de fertilidad, encontrando que no hubo diferencias significativas en los valores del índice.



## V MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Área de estudio.

El área donde se realizó el estudio es una terraza fluvial ubicada entre las coordenadas 18° 19'08" y 18° 19'45" de latitud norte y los 97° 27'00" y 97° 27'40" de longitud oeste ubicada dentro de Zapotitlán Salinas, Estado de Puebla dentro de la región conocida como Valle de Tehuacán Cuicatlán (Figura 1).

El clima que prevalece es del tipo semiseco-semicálido, con lluvias de verano, una temperatura media anual de 21° C, la precipitación media anual es de 420 mm (López *et al.*, 2003).

Las terrazas estudiadas se localizan sobre las márgenes o ribera del río Zapotitlán un río intermitente que corre por la porción meridional del valle, las terrazas son geoformas de origen exógeno formadas por ciclos de erosión y sedimentación, que permitieron el depósito de potentes mantos de aluvión en lo que algún día fue la planicie de inundación del río Zapotitlán o Salado, que cuando el clima cambió y se hizo más seco, dichos mantos fueron seccionados por las corrientes torrenciales del mismo río, quedando separados por el cauce, dando lugar con esto a la formación de las terrazas fluviales (Muñoz-Iniestra, 2009). Por lo anterior, los suelos de dichas terrazas son de origen aluvial, de naturaleza calcárea, profundos y de textura variable.

La vegetación de las terrazas está conformada por un mezquital (*Prosopis laevigata*) (Valiente-Banuet *et al.*, 2009) y palo verde (*Parkinsonia praecox*), el cual se encuentra muy fragmentado formando parches que se alternan con parcelas agrícolas de temporal, áreas con mezquites abiertos y sitios con fuerte erosión (Muñoz-Iniestra *et al.*, 2009).



Figura 1. Área de trabajo Zapotitlán Salinas, Puebla.

## 5.2 Secuencia metodológica

El trabajo de se realizó en cuatro fases:

### 5.2.1 Fase I

Se inició con una revisión bibliográfica para profundizar en el conocimiento teórico relacionado con la calidad del suelo, de igual forma se estudiaron las distintas propuestas metodológicas que se utilizan para evaluar la calidad de los suelos y conocer más acerca de las propiedades que se han empleado como indicadores de calidad del suelo.

De acuerdo con lo revisado se seleccionó un paquete de propiedades edáficas indicadoras que estuvieran directa o indirectamente relacionadas con la evaluación de la calidad del suelo y que fueran factibles de ser medidas considerando las condiciones técnicas con las que se contaba. Por otra parte, con la ayuda de imágenes satelitales de las terrazas fluviales del Valle de Zapotitlán, Puebla se seleccionaron diferentes tipos de coberturas del suelo (Figura 2), en las cuales se pusieron a prueba las propiedades indicadoras seleccionadas previamente. Las terrazas fueron escogidas debido a que son



geoformas homogéneas en cuanto a sus atributos físicos (clima, litología y suelo). Los patrones de uso del suelo y cobertura que se compararon fueron:

- a) Dos matorrales denominados cerrados (MC) ya que presentan vegetación arbustiva densa y cerrada la cual cubre el 100 % de la superficie del suelo; en estos matorrales las especies dominantes son el mezquite y el palo verde.
- b) Dos sitios con matorral abierto (MA), en el cual los arbustos principalmente mezquites, se encuentran distanciados formando islotes (islas de fertilidad), entre cada islote se generan espacios abiertos con suelo desprovisto de vegetación.
- c) Dos sitios desprovistos de vegetación y sin uso (suelo desnudo) (SD)
- d) Dos parcelas agrícolas de temporal (AT)

### 5.2.2 Fase II

Se realizó una salida al campo para localizar y georreferenciar los sitios previamente seleccionados. En cada uno de ellos se levantaron al azar tres muestras de suelo superficial, para lo cual se empleó un barreno cilíndrico que se introdujo hasta una profundidad de 20cm aproximadamente. De cada sitio se obtuvo el mismo volumen de suelo. Las muestras se colocaron en bolsas de plástico debidamente etiquetadas y se transportaron para ser analizadas en el laboratorio de Edafología de la FES Iztacala-UNAM. Algunas de las propiedades seleccionadas fueron evaluadas en campo las cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades indicadoras evaluadas en campo y método con el que se obtuvieron.

Propiedad	Método
Humedad capilar (%)	Medida con hidrómetro de campo digital
Profundidad (cm)	Medida con sonda metálica
Compactación (PSI)	Compactometro de campo

Finalmente, en una bitácora de campo se anotó información complementaria como: coordenadas (Tabla 2), uso del suelo, tipo de vegetación circundante y prácticas de manejo.



Figura 2. Sitios de muestreo en las terrazas fluviales del río Zapotitlán, Puebla.

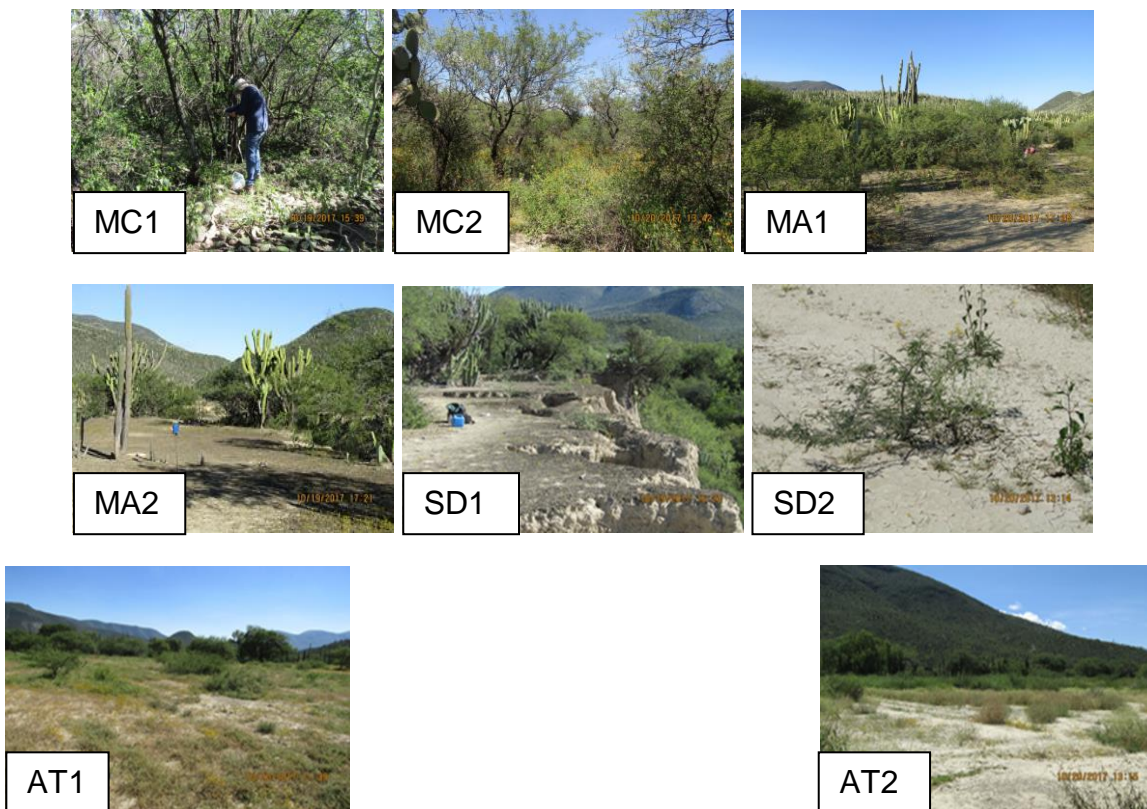


Figura 3. Condiciones de los sitios de muestreo (MC= Matorral cerrado; MA=Matorral abierto; SD= Suelo desnudo; AT= Agricultura de temporal).

Tabla 2. Coordenadas de cada uno de los sitios evaluados.

Sitio	Coordenadas
<b>Matorral cerrado 1 (MC1)</b>	18°19'32.1"N 97°27'17.2"W
<b>Matorral cerrado 2 (MC2)</b>	18°19'22.7"N 97°27'26.4"W
<b>Matorral abierto 1 (MA1)</b>	18°19'34.8"N 97°27'25.2"W
<b>Matorral abierto 2 (MA2)</b>	18°19'35.4"N 97°27'28.0"W
<b>Suelo desnudo 1 (SD1)</b>	18°19'32.0"N 97°27'18.2"W



<b>Suelo desnudo 2 (SD2)</b>	18°19'28.4"N 97°27'41.6"W
<b>Agricultura de temporal 1 (AT1)</b>	18°19'26.9"N 97°27'49.1"W
<b>Agricultura de temporal 2 (AT2)</b>	18°19'26.1"N 97°27'41.5"W

### 5.2.3 Fase III

En el laboratorio las muestras se secaron al aire libre y se tamizaron con una malla de 2mm. Las técnicas que se utilizaron para el análisis de las muestras de suelo se obtuvieron de los procedimientos establecidos en la NOM-021-RECNAT2000, y de manuales especializados en evaluaciones de degradación y de calidad de suelos como: USDA (1984), USDA (1999), Gugino *et al.* (2009) y Muñoz-Iniestra *et al.* (2013). Las propiedades evaluadas se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades indicadoras evaluadas y método con el que se obtuvieron.

<b>Propiedad</b>	<b>Método</b>
<b>Densidad aparente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	Método del cilindro (USDA,1999)
<b>Porosidad (%)</b>	Calculada de las densidades
<b>Estabilidad de agregados (%)</b>	Método de Yoder (Modificado por USDA,1999)
<b>Textura</b>	Método de Bouyoucos (1962)
<b>Materia orgánica (%)</b>	Walkley y Black (1947)
<b>Nitrógeno total (%)</b>	Método Kjeldahl (Modificado por Bremner, 1965)
<b>Carbono oxidable (mg/Kg)</b>	Oxidación con Permanganato de Potasio (Weil <i>et al.</i> 2003)
<b>Fósforo asimilable (ppm)</b>	Método de Olsen (1965)
<b>pH</b>	Método potenciométrico relación suelo-agua 1: 2,5





<b>Capacidad de intercambio catiónico (cmol/Kg)</b>	Método volumétrico del versenato (Schollenberger y Simon, 1945)
<b>Relación C/N</b>	Calculado

#### 5.2.4 Fase IV

Los resultados obtenidos se ordenaron en una base de datos donde se obtuvieron los promedios, la desviación y el error estándar. Para identificar aquellas propiedades que presentaron diferencias significativas entre los diferentes sitios se aplicó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) el cual permitió seleccionar las mejores propiedades indicadoras. Para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ). Antes de la aplicación de las pruebas se verificó que los datos cumplieran el supuesto de normalidad, cuando no fue así se normalizaron transformándolos a una función de arcoseno (Zar, 1999).

Por último, se calculó un índice de calidad de suelo (ICS) utilizando el modelo propuesto por Muñoz- Iniestra *et al.* (2017), el cual fue construido a partir de los modelos de USDA (1999) y Cantú *et al.* (2002). En dicho modelo los valores reales de las propiedades indicadoras que mostraron diferencias significativas se normalizan en una escala uniforme que va de 0 a 1. Para la normalización se consideraron tres situaciones posibles, la primera es cuando el valor máximo o alto del indicador ( $I_{máx}$ ) es lo que más conviene para tener una buena calidad del suelo, en este caso la normalización se hizo utilizando la ecuación  $V_n = (I_m - I_{min}) / (I_{máx} - I_{min})$ , donde  $V_n =$  valor normalizado,  $I_m =$  valor real promedio del indicador,  $I_{máx} =$  valor máximo y  $I_{min} =$  valor mínimo. La segunda situación se da cuando el valor más bajo es lo que más favorece a la calidad del suelo en este caso se aplicó la ecuación:  $V_n = 1 - (I_m - I_{min}) / (I_{max} - I_{min})$  (Cantú *et al.*, 2002) La tercer situación es para los indicadores o propiedades denominadas independientes, en donde los valores altos como bajos no son adecuados para mantener una buena calidad del suelo, sino que estas propiedades tienen un comportamiento particular tal es el caso de la textura, el pH y otras; en estos casos la normalización se hizo siguiendo las tablas de normalización de Muñoz- Iniestra *et al.* (2017). Después de la normalización se realizó una ponderación que consistió en dar un peso relativo



a cada indicador comprendido entre 0 y 1 según la importancia de la propiedad en la CS, en el caso de que el factor fuera cero, el indicador se desecha para el cálculo del índice.

El índice de calidad del suelo se construyó con dos subíndices, el primero incluye a las propiedades que determinan el funcionamiento físico del suelo (ICFS) y el segundo agrupa a propiedades involucradas en el funcionamiento químico-biológico (ICQBS). Para calcular cada subíndice se sumaron todos los valores ponderados de las propiedades incluidas en cada subíndice y posteriormente se obtuvo el promedio; por último, para obtener el índice total de calidad del suelo (ITCS) se sumaron los valores de los dos subíndices y se promediaron. Al final se evaluó la calidad del suelo utilizando los criterios de Cantú *et al.* (2007) (Tabla 4).

Tabla 4. Clases de calidad de suelos (ICS).

<b>ICS</b>	<b>Escala</b>	<b>Clase</b>
<b>Muy alta calidad</b>	0.80-1	1
<b>Alta calidad</b>	0.60-0.79	2
<b>Moderada calidad</b>	0.40-0.59	3
<b>Baja calidad</b>	0.20-0.39	4
<b>Muy baja calidad</b>	0-0.19	5



## VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Comportamiento de los indicadores en los distintos sitios evaluados.

Las propiedades edáficas seleccionadas como indicadores de la calidad del suelo se agruparon en tres categorías: físicos, químicos y biológicos, los valores promedio que presentaron cada uno de ellos en los diferentes sitios se muestran en las tablas 5a, 5b, 6 y 7.

Tabla 5a. Resultados promedio y desviación estándar de los indicadores físicos evaluados por sitio de muestreo.

<b>Sitio</b>	<b>Humedad capilar (%)</b>	<b>Estabilidad de agregados (%)</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Compactación (PSI)</b>
<b>MC1</b>	68.67±5.03	39.2±5.45	8.5±3.97	178.5±24.3
<b>MC2</b>	42.67±8.74	38.7±4.03	9.4±4.27	302±38.24
<b>MA1</b>	58.67±5.77	24.9±13.79	7.8±2.04	320±24.94
<b>MA2</b>	70.33±8.39	13.3±1.97	14±10.74	292±17.51
<b>SD1</b>	62.00±11	20.3±9.44	6.05±2.67	267±34.33
<b>SD2</b>	64.5±27.58	31.9±7.7	12.3±4.97	311±15.95
<b>AT1</b>	83.33±4.04	34.7±9.38	26.8±5.79	142±42.9
<b>AT2</b>	58.00±3	51.3±11.46	13.06±5.1	305±33.75



Tabla 5b. Resultados promedio y desviación estándar de los indicadores físicos evaluados

Sitio	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidad (%)
<b>MC1</b>	28.4±8.27	42.13±6.02	29.47±3.23	0.94±0.19	61.02±10.45
<b>MC2</b>	25.07±6.07	39.87±4.94	35.07±1.22	1.36±0.08	39.71±4.94
<b>MA1</b>	19.3±2.41	47.87±2.20	32.80±0.80	1.40±0.16	39.85±3.23
<b>MA2</b>	52.4±7.30	25.6±6.35	21.87±1.40	1.55±0.12	34.55±8.77
<b>SD1</b>	52.13±9.99	22.8±3.67	25.07±6.74	1.47±0.03	34.95±7.87
<b>SD2</b>	15.87±5.60	45.33±4.67	38.93±8.54	1.23±0.42	42.26±16.74
<b>AT1</b>	17.87±10.8	47.20±6	34.93±9.64	1.51±0.03	32.89±5
<b>AT2</b>	14.67±2.81	47.73±3.23	37.6±4.87	1.57±0.04	28.59±2.46

Tabla 6. Resultados promedio y desviación estándar de indicadores químicos valorados en los distintos sitios.

Sitio	Fósforo asimilable (ppm)	pH	CICT (cmol/kg)
<b>MC1</b>	2.63±0.61	8.14±0.1	25.87±4
<b>MC2</b>	1.87±0.91	8.32±0.15	28.86±4.01
<b>MA1</b>	0.7±0.53	8.62±0.12	18.24±2.1
<b>MA2</b>	0.97±0.61	8.49±0.12	15.91±0.2
<b>SD1</b>	2.77±2.31	7.97±0.19	19.65±1.8
<b>SD2</b>	0.73±0.46	8.22±0.13	24.89±3.85
<b>AT1</b>	1.63±0.58	8.38±0.14	22.38±2.6
<b>AT2</b>	2.6±1.32	8.24±0.08	24.66±0.21



Tabla 7. Resultados promedio y desviación estándar de los indicadores biológicos medidos en el suelo de los distintos sitios de muestreo.

Sitio	Carbono oxidable (mg/kg)	Materia orgánica (%)	Nitrógeno total (%)	C/N
MC1	1170.43±139.98	8.86±2.64	0.34±0.12	17.05±10.07
MC2	1078.16±28.22	4.96±1.52	0.31±0.06	9.26±2.40
MA1	602.27±157.91	2.15±0.69	0.12±0.01	12.40±3.24
MA2	489.25±93.43	1.12±0.51	0.09±0.01	7.26±3.87
SD1	579.35±294.56	1.23±0.77	0.12±0.05	5.50±2.99
SD2	461.26±122.63	1.7±0.1	0.15±0.02	6.51±0.55
AT1	365.88±72.3	1.64±0.2	0.11±0.02	9.19±2.60
AT2	592.93±71.36	1.64±0.2	0.14±0.03	7.21±1.82

Los resultados obtenidos de la prueba ANOVA aplicada para conocer el comportamiento de los indicadores en los diferentes sitios evaluados se presentan en la Tabla 8, donde se observa que la mayoría de las propiedades evaluadas presentó diferencias significativas ( $\alpha < 0.05$ ), solo tres no mostraron diferencias: porosidad, fósforo asimilable y la relación C/N.

Tabla 8. Resultados de ANOVA obtenidos en cada indicador evaluado.

Propiedad	F	P
Humedad capilar	4.224	.009*
Estabilidad de agregados	5.809	.002*
Arena	11.778	.000*
Limo	13.016	.000*
Arcilla	3.788	.013*
Densidad aparente	3.741	.015*
Profundidad	13.796	.000*
Compactación	48.191	.000*



<b>Nitrógeno total</b>	11.656	.000*
<b>Materia orgánica</b>	17.577	.000*
<b>Carbono oxidable</b>	12.471	.000*
<b>pH</b>	7.353	.000*
<b>CIC</b>	7.367	.000*
<b>Porosidad</b>	2.755	.051
<b>Fosforo asimilable</b>	1.919	.133
<b>C/N</b>	2.128	.104

\* Diferencias significativas  $\alpha < 0.05$

Los ocho primeros indicadores de la Tabla 8 son propiedades físicas, todas presentaron diferencias significativas, indicando que la cobertura del suelo o uso que este tenga tiene un efecto sobre estas propiedades, esto también se manifiesta en propiedades químicas como el pH y la capacidad de intercambio catiónico. Por otro lado, de los cuatro indicadores biológicos evaluados sólo tres mostraron diferencias significativas, en el caso de la relación C/N no hay diferencia entre los diferentes sitios ( $\alpha < 0.05$ ).

#### 6.1.1 Propiedades físicas

Como se observa en la Figura 4a, la mayoría de los suelos de los sitios estudiados están dominados por partículas como limo y arcilla por lo que las texturas más frecuentes son las franco arcillo limosas y arcillosas, texturas que favorecen la formación de meso y microporos, que hacen que el paso de fluidos sea lento. La excepción son los sitios MA2 y SD1 donde se presentan texturas franco arenosas lo cual, de acuerdo a con lo reportado por Hernández (2016), garantiza una buena aireación, permeabilidad adecuada y un drenaje moderado; estos mismos sitios son los que presentan el menor contenido de limo, lo cual es una condición favorable, ya que autores como Oldeman (1988) 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. Por otra parte, de acuerdo con la prueba de Tukey el sitio SD2 y AT2 son los que tienen la mayor diferencia en el porcentaje de arcilla en comparación con el sitio MA2, haciendo que estos suelos sean más pesados. Estos cambios en la granulometría pueden ser efecto de la variación en la micro-topografía y el grado de protección que tiene el suelo



(cobertura vegetal) ya que estos factores determinan la intensidad y dirección del escurrimiento superficial (Acín, 2012, Hernández, 2016).

En cuanto a la estabilidad estructural, el porcentaje más alto de agregados estables se encontró en el sitio AT2 (Fig. 4b), seguido de los matorrales cerrados, donde el mayor contenido de residuos orgánicos contribuye a la formación de agregados de origen biogénico los cuales poseen alta estabilidad (Martínez *et al.*, 2003; Cairo y Fundora, 2005; Aguila *et al.*, 2016). Se ha comprobado que diversos compuestos de origen orgánico junto con las arcillas actúan como pegamento que aglutina y atrapa diversas partículas del suelo y por tal razón confieren gran estabilidad a dichas agrupaciones (USDA, 1999; Riginos y Herrick, 2010; Hernández- González *et al.*, 2018). Por otra parte, resulta difícil explicar por qué la parcela agrícola AT2 presentó el mayor porcentaje de agregados estables, tal vez se deba a que de acuerdo con lo observado (Fig. 3), esta no ha sido labrada en los últimos años ya que está invadida de diversas arvenses, además, el abundante contenido de arcilla ha permitido la formación de agregados estables.

Por otro lado, el MA2 obtuvo el menor porcentaje de estabilidad de agregados (13.32%), por lo que este sitio no tiene la capacidad de mantener su estructura durante la lluvia, provocando así la desintegración de agregados en pequeñas partículas que tapan los poros sellando la superficie y afectando con ello la conductividad hidráulica (CIMMYT, 2013).

En cuanto a la densidad aparente, el sitio MC1 obtuvo un valor de 0.94 Kg/m<sup>3</sup>, presentando la mayor diferencia con los sitios MA2, AT1 y AT2 de acuerdo con la prueba de Tukey (Fig. 4c), lo cual está directamente vinculado con el alto porcentaje de materia orgánica que posee el sitio, ya que la materia orgánica incrementa la porosidad, lo cual favorece el desarrollo de las raíces y por tanto el crecimiento saludable de la vegetación (Yilmaz, 2011).

La humedad capilar fue alta en la mayoría de los sitios. El suelo del sitio AT1 tuvo el porcentaje más elevado con un valor de 83.33% (Fig. 4d); los valores altos de la humedad capilar se deben a que la medición se realizó al final del periodo de



lluvias. Por otra parte, el sitio MC2 fue el que tuvo la menor humedad capilar. Este indicador representa la cantidad de agua que está retenida en los microporos, la cual es de suma importancia para la actividad biológica en el suelo. Por esta razón, la mineralización de los nutrientes como el nitrógeno, está ligada a pulsos de precipitación (Fisher *et al.*, 1987).

La mayoría de los sitios mostró valores altos de compactación los cuales estuvieron alrededor de 300 psi. La alta compactación está asociada, por una parte, a la textura fina que presentan los sitios estudiados y por otra al tipo de manejo de la tierra. En las texturas finas, los espacios son reducidos y muchas veces están obstruidos por las propias partículas, provocando con esto la compactación del suelo (Batey, 2009). El sitio MA1 (Fig. 3 y Fig. 4e) fue el más compactado, aquí la superficie del suelo está cubierta totalmente por costras microbióticas, y que de acuerdo con la prueba de Tukey tuvo la mayor diferencia con AT1 y MC1, ya que dichos sitios presentaron suelos menos compactos, el primero es menos compacto debido a las labores agrícolas que tienden a descompactar el suelo, sin embargo, el sitio AT2 que también es agrícola mostro valores mucho más altos, probablemente porque ha estado más tiempo sin actividad. Los valores altos de compactación limitan la tasa de infiltración produciéndose así un aumento en la escorrentía superficial y como consecuencia un proceso de erosión, por otro lado, la compactación también tendrá efecto sobre el crecimiento de las raíces, ya que si ésta es alta la elongación de la raíz disminuiría y finalmente afectaría a la vegetación, ya que al no permitir el crecimiento de las raíces, la cobertura vegetal no dispondría de los nutrientes necesarios y sería más susceptible a la sequía (Porta *et al.*, 2013).

Finalmente, sobre la profundidad de suelo útil el sitio AT1 (Fig. 4f) fue el que presentó el valor más alto (26.8 cm), lo cual puede deberse a que las prácticas de labranza a las que es sometido rompen y evitan la compactación del suelo haciéndolo más profundo para favorecer el desarrollo de los cultivos. Por el contrario, el suelo del sitio SD1 presentó la menor profundidad lo cual estaría limitando el desarrollo de raíces y espacio vital para los organismos del suelo,





reduciendo con esto su actividad. Si se observa la gráfica de la Figura 4f y la Tabla 5a la mayoría de los sitios estudiados presenta escaso volumen de suelo aprovechable.

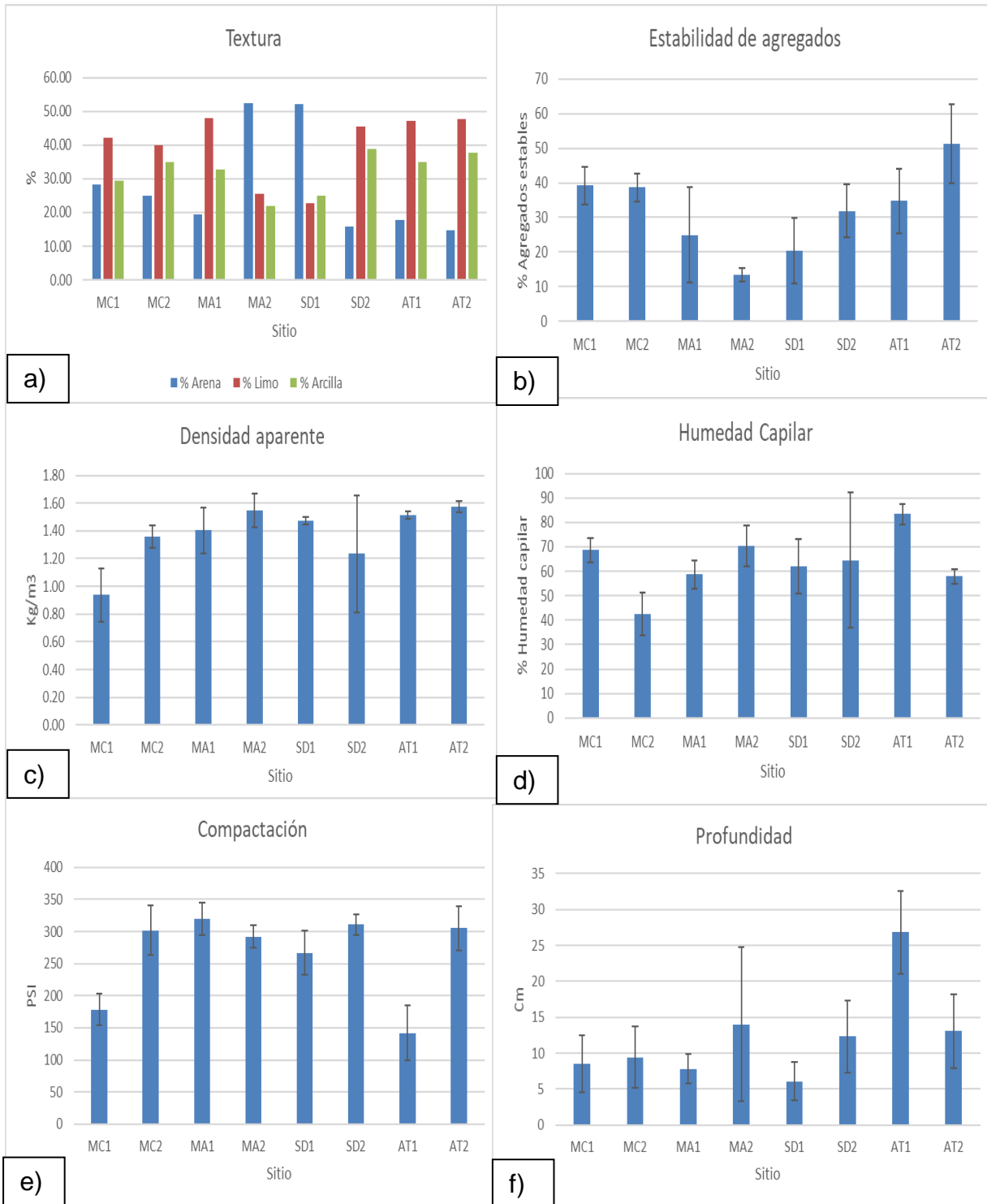


Figura 4. Promedio y error estándar de propiedades físicas con diferencias significativas ( $\alpha < 0.05$ ). (MC= Matorral cerrado; MA=Matorral abierto; SD= Suelo desnudo; AT= Agricultura de temporal).



### 6.1.2 Propiedades químicas

El pH presentó valores alcalinos en todos los sitios evaluados (Fig. 5a), sin embargo, en el sitio MA1 fue el que obtuvo el valor más alto (8.62), en contraste el menos alcalino fue el sitio SD1 (7.97), ambos sitios mostrando las mayores diferencias en relación con la prueba de Tukey; estos valores no concuerdan con los obtenidos por Muñoz-Iniestra *et al.* (2009), en donde los valores de pH menos alcalinos se encontraron en los matorrales cerrados. Cuando se tiene un pH alcalino en el suelo, se pueden presentar problemas en la disponibilidad de nutrientes para las plantas o cultivos, ya que los principales nutrientes son más fácilmente asimilables cuando el pH fluctúa entre 6 y 7 (Brady y Weil, 2008). El pH es una propiedad muy variable que depende de factores como: la estación del año, la cobertura del suelo, la pendiente del terreno, la mineralogía de los horizontes, así como el drenaje (Porta et al., 2003). Los valores alcalinos de los suelos estudiados obedecen a su naturaleza calcárea (Fluvisoles calcáricos), (López *et al.*, 2003) y a la presencia de un clima cálido seco donde la falta de lluvia impide la lixiviación de las sales, por otra parte, las elevadas temperaturas intensifican la evaporación favoreciendo el ascenso de sales.

Respecto a la capacidad de intercambio catiónico, se encontró el valor más alto en el sitio MC2 (28.86 cmol/kg) seguido por el MC1 (25.87 cmol/kg), ambos sitios presentaron la mayor diferencia con el MA2 (Fig.5b). Este patrón es entendible debido a que esta propiedad se encuentra fuertemente relacionada con la presencia de coloides orgánicos e inorgánicos (McBride, 1999; Porta et al., 2013). Dado que los sitios MC 1 y 2 son los que tienen los mayores contenidos de materia orgánica; es lógico suponer que estos sitios presentaran un intercambio catiónico superior a los demás sitios.

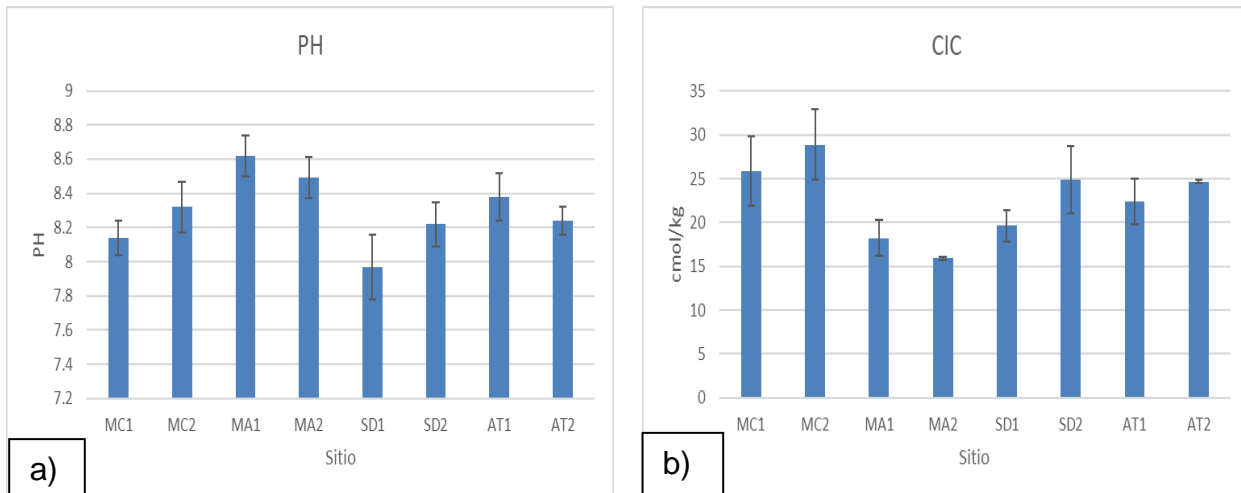


Figura 5. Promedio y desviación estándar de propiedades químicas con diferencias significativas ( $\alpha < 0.05$ ). (MC= Matorral cerrado; MA=Matorral abierto; SD= Suelo desnudo; AT= Agricultura de temporal).

### 6.1.3 Propiedades biológicas

El porcentaje de materia orgánica tuvo diferencias significativas entre los suelos de los matorrales cerrados con el resto de los sitios (Tabla 7 y Figura 6b) debido principalmente a que el suelo presenta una cobertura vegetal densa, por lo que existe un aporte continuo de residuos vegetales, en este sentido el contenido de MOS fue más elevado en los sitios de MC, estos resultados concuerdan con lo encontrado por Muñoz-Iniestra *et al.* (2009 y 2013) y Aguila *et al.* (2016), donde encontraron que los contenidos más altos de materia orgánica se presentaron en un ecosistema natural en comparación con agroecosistemas o vegetación perturbada. La materia orgánica es uno de los indicadores más aceptados por su importancia en el funcionamiento biológico de los suelos, del cual depende el reciclaje de nutrientes (Cairo y Fundora, 2005). Un alto contenido en materia orgánica proporciona nutrientes a las plantas y mejora la disponibilidad de agua, lo cual mejora la fertilidad del suelo. Además, mejora la estabilidad estructural del suelo promoviendo la formación de agregados que, junto con la porosidad, aseguran suficiente aireación e infiltración de agua para promover el crecimiento de las plantas (FAO, 2017).



Otra propiedad relacionada y que también presentó diferencias significativas similares a la materia orgánica es el carbono oxidable (Tabla 7 y Figura 6a). Este tipo de carbón representa el carbono fácilmente oxidable y de fácil acceso para los organismos del suelo. En este caso los sitios con mayor contenido de materia orgánica son los que presentaron la mayor concentración de carbono activo. Estos resultados indican que los matorrales cerrados son los lugares en donde los organismos del suelo cuentan con más recursos y donde el reciclaje del carbono es más eficiente y balanceado. A pesar de esto, hay una diferencia importante entre los dos sitios MC, la cual está dada por la relación C/N ya que en el MC1 esta es de 17.05 y en el MC2 de 9.26, lo que indica que la tasa de reciclaje es más intensa en MC2 que en MC1. Dicha diferencia obedece, en este caso, a la naturaleza de los residuos orgánicos lo cual está directamente relacionado con la estructura de la vegetación de cada sitio. En el MC1 (Fig.3) se tiene un estrato denso dominado por arbustos y otro constituido por herbáceas frecuentes en el sotobosque, en cambio en el MC2 (Fig.3) hay también un estrato cerrado de arbustos y otro igualmente denso de herbáceas anuales, en este caso las herbáceas aportan residuos orgánicos más lábiles que los arbustos cuyos residuos son más resistentes y difíciles de degradar ya que están constituidos principalmente por restos leñosos (ligninas celulosas, etc.) (Porta *et al.* 2013)

Finalmente, en el porcentaje de nitrógeno total se obtuvieron diferencias significativas en los sitios de matorral cerrado con respecto a los demás sitios (Fig. 6c) ya que se ha documentado la influencia que tiene la caída de las hojas en el ciclo de los nutrientes por el retorno de la materia orgánica y de los elementos minerales, llegando a ser más de 90% del nitrógeno que puede ser absorbido por las plantas (Chapin *et al.*, 2002).

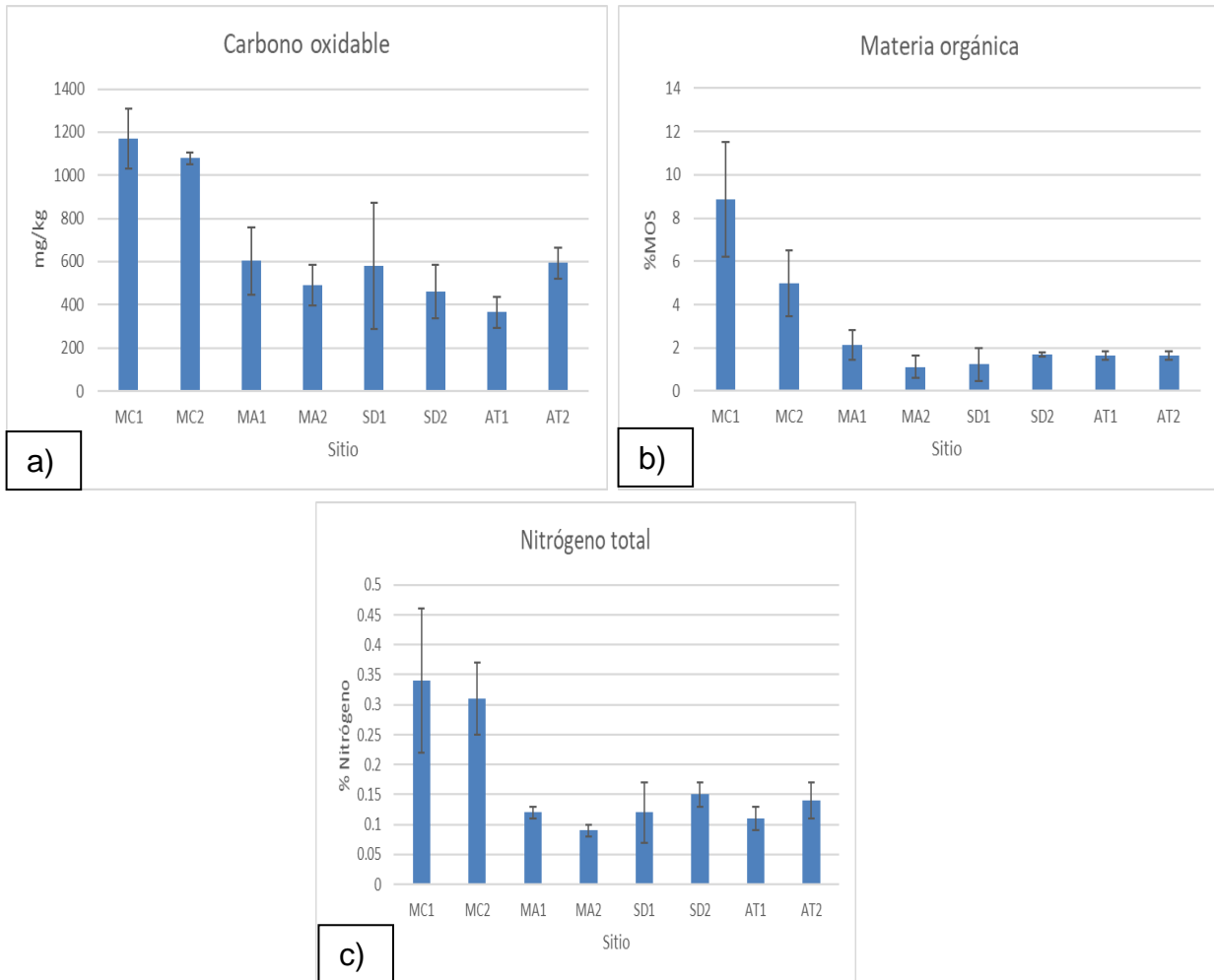


Figura 6. Promedio y desviación estándar de propiedades biológicas con diferencias significativas ( $\alpha < 0.05$ ). (MC= Matorral cerrado; MA=Matorral abierto; SD= Suelo desnudo; AT= Agricultura de temporal).



## 6.2 Índice de Calidad del suelo

### 6.2.1 Subíndices del funcionamiento físico (ICFS) y químico biológico (ICQBS)

El índice total de calidad del suelo (ITCS) se obtuvo calculando los subíndices (ICF e ICQB) de los suelos en los distintos sitios evaluados (Fig. 7), en las Tablas 9, 10, 11 y 12, se muestran los valores obtenidos en los distintos conceptos considerados para el cálculo de cada subíndice.

Tabla 9. Matrices utilizadas para el cálculo de los subíndices de ICFS y ICQBS en los sitios MC1 y MC2

MC1						MC2					
Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado	Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado
Densidad Aparente kg/m <sub>2</sub>	< mejor	0.94	1.0	1.0	1.0	Densidad Aparente kg/m <sub>2</sub>	< mejor	1.36	0.34	1.0	0.34
Humedad Capilar %	> mejor	68.67	0.64	0.75	0.48	Humedad Capilar %	> mejor	42.67	0.0	0.75	0.0
Estabilidad de agregados %	> mejor	39.29	0.68	0.75	0.51	Estabilidad de agregados %	> mejor	38.72	0.67	0.75	0.5
Arena %	Independiente	28.40	0.50	0.25	0.13	Arena %	Independiente	25.07	0.5	0.25	0.13
Limos %	Independiente	42.13	0.25	0.25	0.06	Limos %	Independiente	39.87	0.5	0.25	0.13
Arcillas %	Independiente	29.46	1.00	0.25	0.25	Arcillas %	Independiente	35.07	0.75	0.25	0.19
Compactación PSI	< mejor	178.5	0.79	0.50	0.40	Compactación psi	< mejor	302	0.1	0.5	0.05
Profundidad cm	> mejor	8.50	0.12	1.00	0.12	Profundidad cm	> mejor	9.40	0.16	1.0	0.16
				Sumatoria	2.95					Sumatoria	1.50
				<b>ICFS</b>	<b>0.368</b>					<b>ICFS</b>	<b>0.187</b>

Indicador	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado	Indicador	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado
Nitrógeno %	> mejor	0.34	1.0	1.0	1.0	Nitrógeno %	> mejor	0.31	0.89	1.0	0.89
Materia orgánica %	> mejor	8.86	1.0	1.0	1.0	Materia orgánica %	> mejor	4.96	0.5	1.0	0.5
Carbono Oxidable mg/kg	> mejor	1170.43	1.0	1.0	1.0	Carbono Oxidable mg/kg	> mejor	1078.16	0.89	1.0	0.89
ph	independiente	8.14	0.5	0.5	0.25	pH	independiente	8.32	0.5	0.5	0.25
CICT cmol/kg	> mejor	25.87	0.77	0.75	0.58	CICT cmol/kg	> mejor	28.86	1	0.75	0.75
				Sumatoria	3.83					Sumatoria	3.28
				<b>ICQBS</b>	<b>0.766</b>					<b>ICQBS</b>	<b>0.656</b>



Tabla 10. Procedimiento seguido para calcular los subíndices de ICFS y ICQBS de los sitios MA1 y MA2.

MA1						MA2					
Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado	Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado
Densidad aparente kg/m <sub>2</sub>	< mejor	1.40	0.27	1.0	0.27	Densidad aparente kg/m <sub>2</sub>	< mejor	1.54	0.04	1.0	0.04
Humedad Capilar %	> mejor	58.67	0.39	0.75	0.30	Humedad Capilar %	> mejor	70.33	0.68	0.75	0.51
Estabilidad de agregados %	> mejor	24.96	0.31	0.75	0.23	Estabilidad de agregados %	> mejor	13.32	0.0	0.75	0.0
Arena %	Independiente	19.33	0.25	0.25	0.06	Arena %	Independiente	52.40	0.75	0.25	0.19
Limo %	Independiente	47.87	0.25	0.25	0.06	Limo %	Independiente	25.60	1.0	0.25	0.25
Arcilla %	Independiente	32.80	0.75	0.25	0.19	Arcilla %	Independiente	21.86	1.0	0.25	0.25
Compactación psi	< mejor	320	0.00	0.50	0.0	Compactación psi	< mejor	292.00	0.16	0.5	0.08
Profundidad cm	> mejor	7.80	0.08	1.0	0.08	Profundidad cm	> mejor	14	0.38	1.0	0.38
				Sumatoria	1.139					Sumatoria	1.70
				<b>ICFS</b>	<b>0.148</b>					<b>ICFS</b>	<b>0.212</b>

Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado	Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado
Nitrógeno %	>Mejor	0.12	0.1	1.0	0.10	Nitrógeno %	> mejor	0.09	0.0	1.0	0.0
Materia orgánica %	> mejor	2.15	0.13	1.0	0.13	Materia orgánica %	> mejor	1.12	0.0	1.0	0.0
Carbono Oxidable mg/kg	> mejor	602.27	0.29	1.0	0.29	Carbono Oxidable mg/kg	> mejor	489.25	0.15	1.0	0.15
pH	independiente	8.62	0.25	0.5	0.13	pH	independiente	8.49	0.5	0.5	0.25
CICT cmol/kg	> mejor	18.24	0.18	0.75	0.13	CICT cmol/kg	> mejor	15.91	0.0	0.75	0.0
				Sumatoria	0.78					Sumatoria	0.4
				<b>ICQBS</b>	<b>0.156</b>					<b>ICQBS</b>	<b>0.08</b>





Tabla 11. Obtención de los subíndices de ICFS y ICQBS de los sitios SD1 y SD2.

SD1						SD2					
Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado	Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado
Densidad aparente kg/m <sub>2</sub>	< mejor	1.47	0.16	1.0	0.16	Densidad aparente kg/m <sub>2</sub>	< mejor	1.23	0.54	1.0	0.54
Humedad Capilar %	> mejor	62.00	0.48	0.75	0.36	Humedad Capilar %	> mejor	64.5	0.54	0.75	0.40
Estabilidad de agregados %	> mejor	20.30	0.18	0.75	0.14	Estabilidad de agregados %	> mejor	31.92	0.49	0.75	0.37
Arena %	Independiente	52.13	0.75	0.25	0.19	Arena %	Independiente	15.87	0.25	0.25	0.06
Limo %	Independiente	22.88	1.0	0.25	0.25	Limo %	Independiente	45.33	0.25	0.25	0.06
Arcilla %	Independiente	25.07	1	0.25	0.25	Arcilla %	Independiente	38.93	0.5	0.25	0.13
Compactación psi	< mejor	267	0.3	0.5	0.15	Compactación psi	< mejor	311	0.05	0.5	0.03
Profundidad cm	> mejor	6.05	0.0	1.0	0.0	Profundidad cm	> mejor	12.3	0.3	1.0	0.30
				Sumatoria	1.50					Sumatoria	1.89
				<b>ICFS</b>	<b>0.187</b>					<b>ICFS</b>	<b>0.236</b>

Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado	Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado
Nitrógeno %	> mejor	0.12	0.12	1.0	0.12	Nitrógeno %	> mejor	0.15	0.24	1.0	0.24
Materia orgánica %	> mejor	1.23	0.02	1.0	0.02	Materia orgánica %	> mejor	1.7	0.08	1.0	0.08
Carbono Oxidable mg/kg	> mejor	579.35	0.27	1.0	0.27	Carbono Oxidable mg/kg	> mejor	461.26	0.12	1.0	0.12
pH	independiente	7.97	0.5	0.5	0.25	pH	independiente	8.22	0.50	0.50	0.25
CICT cmol/kg	> mejor	19.65	0.29	0.75	0.22	CICT cmol/kg	> mejor	24.89	0.69	0.75	0.52
				Sumatoria	0.88					Sumatoria	1.21
				<b>ICQBS</b>	<b>0.176</b>					<b>ICQBS</b>	<b>0.242</b>



Tabla 12. Cálculo mediante el cual se obtuvieron los subíndices de ICFS y ICQBS de los sitios AT1 y AT2.

**AT1**

Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado
Densidad aparente kg/m <sub>2</sub>	< mejor	1.51	0.10	1.00	0.10
Humedad Capilar %	> mejor	83.33	1.00	0.75	0.75
Estabilidad de agregados %	> mejor	34.78	0.56	0.75	0.42
Arena %	Independiente	17.87	0.25	0.25	0.06
Limo %	Independiente	47.2	0.25	0.25	0.06
Arcilla %	Independiente	34.93	0.75	0.25	0.19
Compactación psi	< mejor	142.0 0	1.00	0.50	0.50
Profundidad cm	> mejor	26.80	1.00	1.00	1.00
				Sumatoria	3.08
				<b>ICFS</b>	<b>0.385</b>

**AT2**

Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado
Densidad aparente kg/m <sub>2</sub>	< mejor	1.57	0.00	1.00	0
Humedad Capilar %	> mejor	58	0.38	0.75	0.28
Estabilidad de agregados %	> mejor	51.36	1.00	0.75	0.75
Arena %	Independiente	14.67	0.25	0.25	0.06
Limo %	Independiente	47.73	0.25	0.25	0.06
Arcilla %	Independiente	37.6	0.5	0.25	0.13
Compactación psi	< mejor	305	0.08	0.50	0.04
Profundidad cm	> mejor	13.6	0.36	1.00	0.36
				Sumatoria	1.68
				<b>ICFS</b>	<b>0.21</b>

Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado
Nitrógeno %	> mejor	0.11	0.05	1.0	0.05
Materia orgánica %	> mejor	1.64	0.07	1.0	0.07
Carbono Oxidable mg/kg	> mejor	365.8 8.00	0.00	1.0	0.00
pH	independiente	8.38	0.50	0.5	0.25
CICT cmol/kg	> mejor	22.38	0.50	0.75	0.38
				Sumatoria	0.75
				<b>ICQBS</b>	<b>0.15</b>

Indicador unidades	Categoría del indicador	Valor real	Valor normalizado	Criterio de ponderación	Valor ponderado
Nitrógeno %	> mejor	0.14	0.17	1.0	0.17
Materia orgánica %	> mejor	1.64	0.07	1.0	0.07
Carbono Oxidable mg/kg	> mejor	592.93	0.28	1.0	0.28
pH	independiente	8.24	0.5	0.5	0.25
CICT cmol/kg	> mejor	24.66	0.68	0.75	0.51
				Sumatoria	1.28
				<b>ICQBS</b>	<b>0.256</b>



De acuerdo con lo que se observa en la gráfica de la Figura 7 destacan los matorrales cerrados por tener una mejor calidad sobre todo en lo que respecta al funcionamiento químico biológico, ya que todos los demás sitios presentan un suelo con un ICQBS muy bajo. El mayor valor del ICQBS de los matorrales cerrados se debe en gran parte a que tienen un mejor funcionamiento biológico ya que presentan mayores contenidos de materia orgánica, nitrógeno total y carbono oxidable (Tabla 9). Por otra parte, el ICFS presenta valores bajos para todos los sitios, donde solo la parcela AT1 mostró un valor ligeramente superior a la mayoría debido a que el suelo fue menos compacto y más profundo (Figura 7 y Tabla 12), lo cual seguramente se debe a las prácticas de manejo que recibe dicha parcela.

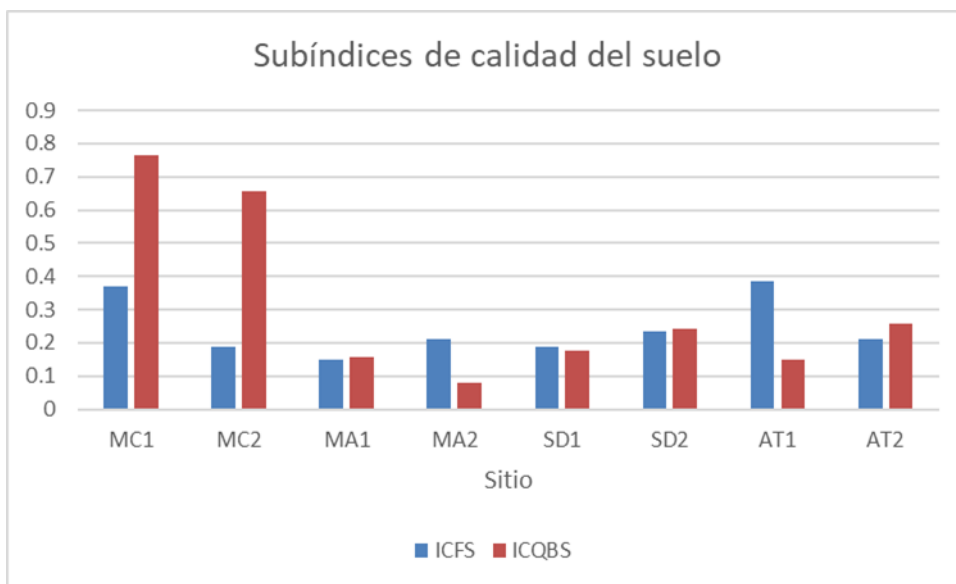


Figura 7. Valores obtenidos para cada subíndice de calidad del suelo (ICFS y ICQBS) en cada sitio.

### 6.2.2 Índice Total de Calidad del Suelo

Con el promedio de los subíndices ICFS e ICQBS se obtuvo el Índice Total de Calidad del Suelo (ITCS), en la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos para cada sitio. De acuerdo con lo anterior los sitios MC1 y MC2 fueron los que presentaron una de mejor calidad, donde según la escala de valoración aplicada (Tabla 4) se consideran como suelos de moderada calidad con un valor de 0.56 y 0.42 respectivamente, en contraparte los suelos de los sitios MA1, MA2 y SD1

fueron los que presentaron los valores más bajos del ITCS clasificándose como de muy baja calidad, los demás sitios obtuvieron valores intermedios considerándose de baja calidad.

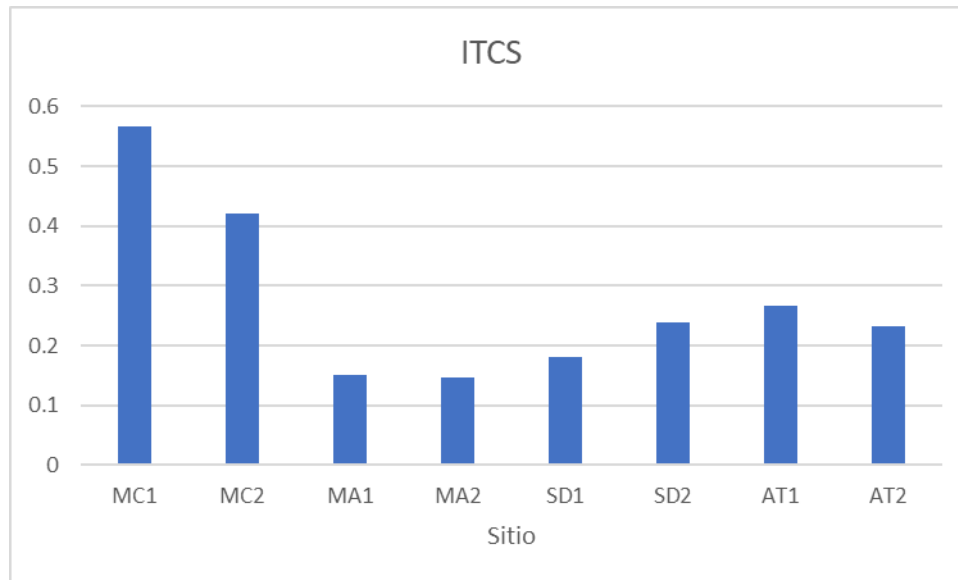


Figura 8. Valores del Índice Total de Calidad del Suelo (ITCS) obtenidos para cada sitio.

De acuerdo con estos resultados los sitios MC1 y MC2 son los que mejor funcionamiento edáfico presentan con respecto a los demás, sin embargo, los valores del ITCS obtenidos no fueron tan altos como se esperaría (0.56 y 0.42 respectivamente). Estos resultados pueden interpretarse en el sentido de que a pesar de que estos suelos están protegidos por una buena cobertura vegetal su funcionamiento natural no es el óptimo. Si se revisan con detalle los datos de los dos subíndices (ICFS y ICQBS) de ambos sitios (Fig.7), es perceptible que las mayores deficiencias están relacionadas con el funcionamiento físico, con esto se puede reconocer que los principales problemas de los suelos están relacionados al escaso espesor de suelo aprovechable, la compactación y una textura poco favorable como los principales inconvenientes. Por otra parte, el funcionamiento químico biológico fue bueno ya que los valores obtenidos en el ICQBS fueron 0.76 y 0.65 respectivamente, indicando que los procesos y funciones químico-biológicas de estos suelos se realizan con normalidad de acuerdo con las condiciones ambientales de los sitios, por lo que podemos afirmar que en los



suelos de los matorrales cerrados hay buenas reservas de nitrógeno total, materia orgánica, carbono oxidable, así como un buen intercambio catiónico.

Los suelos de los sitios SD2 y las parcelas agrícolas AT1 y AT2 se ubican con baja calidad de acuerdo los criterios aplicados, en lo particular el sitio SD2, presentó fuertes problemas en la densidad aparente, profundidad útil y compactación, de igual forma también el ICQBS fue bajo debido a la escasez de nitrógeno total y carbono oxidable, consecuencia de un pobre contenido de materia orgánica; indicando con esto un mal funcionamiento de la microbiota del suelo (Borie *et al.*, 1999).

En cuanto al suelo del sitio AT1 obtuvo el valor más alto en el ICFS (0.38) inclusive superando a los MC, este resultado se ve respaldado por su alta humedad capilar, poca compactación y alta profundidad, por otro lado, su ICQBS (0.15) se ve disminuido por el nitrógeno, materia orgánica y carbono oxidable. En resumen, la parcela AT1 presenta buena condición en el funcionamiento físico pero fuertes deficiencias en los procesos químico-biológicos.

Por su parte el sitio AT2 presenta valores bajos tanto en índice ICFS (0.21), como el ICQBS (0.25), identificando problemas en: la densidad aparente, la compactación, la humedad capilar y la profundidad, así como bajo porcentaje de nitrógeno, materia orgánica y contenido de carbono oxidable.

Por último, como ya se mencionó los suelos con menor calidad fueron los sitios MA1, MA2 y SD1, mostrando valores bajos en los índices obtenidos. Los problemas detectados son múltiples y tienen que ver con el funcionamiento físico, químico y biológico. En lo físico las principales afectaciones son tener poco suelo útil debido, por un lado, a la presencia de costras físicas duras sobre la superficie las cuales impiden la entrada de semillas, agua y gases (FAO, 1993) y por el otro el subsuelo es muy compacto y masivo difícil de explorar por las raíces de las plantas y los organismos del suelo (>300 psi de compactación). Respecto a los procesos químicos estos sitios poseen un intercambio catiónico bajo lo que limita la reserva de algunos y nutrientes (Fig. 5b), esta situación puede ser atribuida al



bajo contenido de materia orgánica que presentan ya que se ha comprobado que los compuestos orgánicos sobre todo los coloidales son los ayudan a mantener un nivel alto de intercambio (Porta *et al.* 2003). Por otra parte el pH de los suelos de los matorrales abiertos (MA1 y MA2) son los de reacción más alcalina (Fig. 5a), afectando con esto la disponibilidad de algunos nutrientes, haciendo que estos suelos sean menos fértiles y poco productivos, una excepción es el sitio SD1 que obtuvo el valor de pH más bajo (7.97) con respecto a los demás sitios (Tabla 6), este comportamiento resulta difícil de explicar y tal vez podría estar relacionado con el efecto acidificante que pudieran tener las costras microbíticas que cubren la superficie de este sitio o bien por el incremento de la infiltración provocado por la presencia de las mismas costras, lo cual favorece el lavado de sales reduciendo así el pH del suelo (Belnap *et al.*, 2003).

En este sentido a partir de los resultados obtenidos en el índice aplicado y comparándolos con los antecedentes consultados se puede decir que los suelos de los sitios estudiados, que han sido modificados en su cobertura vegetal natural, presentan cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas reduciendo de este modo su calidad, entre los trabajos está el realizado por Moreno *et al.*, (2015) quienes compararon un suelo en proceso de recuperación con 2 agroecosistemas, encontrando que el primero presentó los mejores valores en cuanto al pH y el contenido de nutrientes. De igual modo Muñoz-Iniestra *et al.*, (2009) demostraron cómo la condición del suelo respecto a su cobertura modificó la densidad aparente, la infiltración, la porosidad, el pH y la materia orgánica, siendo los suelos protegidos los que presentaron los mejores valores de calidad. En la mayor parte de los trabajos que se han realizado en relación con calidad del suelo, la materia orgánica es considerada un indicador de suma importancia ya que de su valor dependen muchas propiedades que se relacionan con el buen funcionamiento físico y químico. Entre estos estudios se encuentra el de Cantú *et al.* (2007) en el cual, al aplicar el índice de calidad en un agroecosistema se obtuvo un valor de 0.47, resultado que se vio sumamente afectado por un muy bajo contenido de M.O que conllevó a su vez a la disminución de otras variables. En el presente trabajo se pudo comprobar esto ya que, al tener el suelo un



contenido favorable de materia orgánica como el de los matorrales cerrados, mejoró su ICQBS de manera notable, ya que de igual modo se incrementa el contenido de nutrientes como el nitrógeno y hay una mejor capacidad de intercambio catiónico, además de presentar mejoras en algunas propiedades físicas.



## VII CONCLUSIONES

- La cobertura vegetal y el uso que se le da al terreno tuvo un efecto significativo sobre la calidad del suelo de los sitios estudiados en la terraza fluvial del Valle de Zapotitlán, Puebla.
- De las 16 propiedades indicadoras del suelo evaluadas 13 resultaron con diferencias significativas entre los distintos sitios evaluados; de ellas ocho son propiedades físicas, entre las que destacan la estabilidad de agregados, la profundidad y la compactación; dos son propiedades químicas (pH y capacidad de intercambio catiónico) y tres propiedades biológicas (porcentaje de materia orgánica, carbono oxidable y nitrógeno total).
- De acuerdo con el índice de calidad aplicado, los suelos de los matorrales cerrados tienen una mejor calidad clasificándose como de moderada calidad, por otro lado, los suelos de los sitios MA1, MA2 y SD1 fueron los de peor calidad categorizándose como de muy baja, el resto de los sitios entraron en la categoría de baja calidad.
- La cobertura vegetal y el uso del terreno tuvieron influencia significativa en las propiedades físicas químicas y biológicas del suelo, los suelos de todos los sitios evaluados presentaron un mal funcionamiento físico. Solo los sitios de los matorrales cerrados mostraron un buen funcionamiento químico biológico el cual es dependiente de los niveles de la materia orgánica.
- El empleo del índice construido y aplicado resultó ser una herramienta útil para conocer, en parte, el estado de las funciones esenciales que el suelo realiza, a través de un diagnóstico objetivo y puntual que ayuda a identificar en dónde están los puntos críticos del mal funcionamiento del suelo, lo cual permite tomar decisiones para corregir la problemática.





## VIII BIBLIOGRAFÍA

- Acín, C. M. 2012. Efectos de diferentes usos del territorio en las características edáficas: Influencia de una vía pecuaria en las funciones de regulación del suelo. Trabajo fin de Master. Master oficial en Ecología. Universidad Autónoma de Madrid.
- Aguila, E., Y. Marrero, H. P. Hernández y Y. Ruiz. 2016. Efecto del uso del suelo sobre su calidad en áreas de la Finca “Baños de Marrero”. *Centro Agrícola*. 43 (2):14-22.
- Albaladejo, M. J., R. Martínez-Mena y V. Castillo. 1998. Soil degradation and desertification induced by vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Use Manage*. 14: 1-5.
- Andrews, S.S, D. L. Karlen y J. P. Mitchel. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 90: 25–45.
- Arshad, M. A. y G. M. Coen. 1992. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. *American J. of Alternative Agriculture*. 7: 25-31.
- Astier-Calderón M., M. Maass-Moreno y J. Etchevers-Barra. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*. 36 (5): 605-620.
- Aveyard, J. M. 1988. Land degradation: changing attitudes, why? *J. Soil Conserv*. 44: 46-51.
- Batey, T. 2009. Soil compaction and soil management: a review. *Soil Use and Management*. 25: 335–345.
- Bautista, A., J. Etchevers, R. F. del Castillo y C. Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*. 13 (2): 90-97.
- Belnap J, R. Prasse, K.T. Harper. 2003. Influence of biological soil crusts on soil environments and vascular plants. In *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*, Belnap J, Lange OL (eds). Springer-Verlag: Berlin; 281–300.
- Borie, G., S. M. Aguilera y P. Peirano.1999. Actividad biológica en suelos. *Frontera Agrícola*. 5: 29-32.
- Brady, N. C. y R. R. Weil. 2008. *The Nature and Properties of Soils*; Pearson International Edition ed. United States of America.



- Brejda, J. J., T. B. Moorman, D. L. Karlen y T. H. Dao. 2000. Identification of regional Soil Quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2115-2124.
- Brejda, J. y T. B. Moorman. 2001. Identification and interpretation of regional soil quality factors for the Central High Plains of the Midwestern USA. 535-540 pp In: Stott, D. E., R. H. Mohtar and G. C. Steinhardt (eds). 2001. *Sustaining the Global Farm*. 1169 p.
- Budd, W. 1992. What capacity the land? *J. Soil Water Conservation*.47: 28-31.
- Buol, S. 1995. Sustainability of soil use. *Annual Review of Ecology and Systematic*. 26:25-44.
- Cairo, P. y O. Fundora. 2005. *Edafología*. Ed. Félix Varela. Ciudad de La Habana, Cuba. 382p.
- Cantú, M. P., A. R. Becker, J. C. Bedano, T. B. Musso y H. F. Schiavo. 2002. Evaluación de la calidad ambiental y calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD. 6 pp.
- Cantú, P.M, A. Becker, C. J. Bedano, F. H. Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo*. 25:173-178.
- Carter, M.R., E. G. Gregorich, D. W. Anderson, J. W. Doran, H. H. Janzen y F. J. Pierce. 1997. Concepts of soil quality and their significance. Soil quality for crop production and ecosystem health. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.
- Carter, R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal*. 94:38.
- Chapin, F. S., P. A. Matson y H. A. Mooney. 2002. *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Springer. New York, NY, USA
- CONAZA (Comisión Nacional de las Zonas Áridas). 2016. [http://www.conaza.gob.mx/transparencia/Documents/Zonas\\_Áridas.doc](http://www.conaza.gob.mx/transparencia/Documents/Zonas_Áridas.doc)



- Centro Internacional de Manejo de Maiz y Trigo (CIMMYT). 2013. *Estabilidad de los agregados del suelo tamizado en húmedo*. Guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo. MasAgro. CIMMYT. 16 p.
- Dexter, A. R. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effect of soil texture, density and organic matter, and effect on root growth. *Geoderma*. 120:201
- Diouf, A. y E. Lambin. 2001. Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal. *J. Arid Environ*. 48: 129-148
- Doran, J. W. y T. Parkin. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. *Soil Science Society of America*, (35).
- Doran, J. W. y T.B. Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil Quality: a minimum data set. Pp. 25-37. In: *Methods for assessing Soil Quality*, SSSA Special Publication N° 49, Wisconsin, USA.
- Doran, J.W. y M.R. Zeiss. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol*. 15: 3-11.
- Dumanski, J., S. Gameda y C. Pieri. 1998. Indicators of land quality and sustainable land management. The World Bank, Washington DC, USA.
- Estrada-Herrera, I. R., C. Hidalgo-Moreno, R. Guzmán-Plazola, J. J. Almaraz, H. Navarro-Garza y J. D. Etchevers-Barra. 2017. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*. 51 (8): 813-831.
- Fisher, F. M., L. W. Parker, J. P. Anderson y W. G. Whitford. 1987. Nitrogen mineralization in a desert soil: Interacting effects of soil moisture and nitrogen fertilizer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 1033-1041
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1993. Soil tillage in Africa: Needs and challenges (FAO soils bulletin). FAO Serie: soils bulletin: 190
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2004. Carbon sequestration in drylands. Report on World Soil Resources, No.102. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. ISBN 92-5-105230-1



- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2017. Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia
- Gallopin, G. 1997. Indicators and their use: information for decision making. Part 1 Introduction. B Moldan y S Billharz (eds.). Sustainability indicators. Wiley, Chichester-N. York.
- Ghaemi, M., A. R. Astarai, H. Emami, M. Nassiri y S. H. Sanaeinejad. 2014. Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds- east of Mashhad- Iran. *J. Soil Sci. Plant Nut.* 14: 987-1004.
- Gugino, B. K., O. J. Idowu, R. R. Schindelbeck, H. M. van Es, B. N. Moebius-Clune, D. W. Wolfe, J. E. Thies y G. S. Abawi. 2009. Cornell Soil Health Assessment Training Manual, Edition 2.0. Cornell University, Geneva, NY.
- Hernández, D. E. 2016. Impacto de diferentes coberturas y usos de la tierra, en la calidad del suelo de una zona semiárida. Tesis de Licenciatura (Biología). Facultad de Estudios Superiores Iztacala. UNAM. 48 p.
- Hernández- González, D. E., D. J. Muñoz-Iniestra, F. López-Galindo y M. M. Hernández-Moreno. 2018. Impacto del uso de la tierra en la calidad del suelo en una zona semiárida del valle del mezquite, Hidalgo, México. *BIOCYT Biología, ciencia y tecnología.* 11(43): 792-807.
- Hernández, A., L. V. Macías, C. A. Naveda, A. M. Guzmán, M. Vivar, T. R. Zambrano, F. Mesías, K. Ormanza, R. V. León y G. A. López. 2017. Variaciones en algunas propiedades del suelo por el cambio de uso de la tierra, en las partes media y baja de la microcuenca Membrillo, Mnabi, Ecuador. *Cultivos Tropicales.* 38 (1): 50-56.
- Jiménez, R. y V. González-Quiñones. 2006. La calidad de los suelos como una medida para su conservación. *Edafología.* 13 (3): 125-138.
- Karlen, D., M.J Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris y G. E. Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America.* 61: 4-10.
- Larson, W.E. y F. J. Pierce. 1991. Conservation and Enhancement of Soil Quality. Evaluation for sustainable land management in the developing world. En *Proc. of the Int. Work-shop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Chiang Rai.* pp. 175-203. 15-21.



- Lilburne, I., G. Saprling y L. Schipper. 2004. Soil quality monitoring. New Zealand development of an interpretative framework. *Agric. Ecosyst. Environ.* 104: 533-544.
- 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.
- Martínez, F., B. J. Calero, R. Nogales y L. Rovesti. 2003. *Lombricultura. Manual práctico*. Biblioteca ACTAF, La Habana, Cuba. 100 p.
- Mc Bride, M. B., 1999. Chemisorption and precipitation reactions. M. E. Sumner: Handbook of Soil Science. CRC Press: Boca Raton, USA.
- Moreno, C., M. I. González y J. A. Egido. 2015. Influencia del manejo sobre la calidad del suelo. *Revista Científica Ecuatoriana*. 2(1):33-40.
- Mosiño A. P. 1983. Climatología de las zonas áridas y semiáridas de México pp. 9-36. In: Memorias del simposio “Caracterización, uso actual y potencial de los recursos agrícolas de zonas áridas y semiáridas de México”. Colegio de Postgraduados, Chapingo. México.
- Muñoz-Iniestra, D. J. 2008. 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. Tesis de Doctorado (Geografía). Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. 77 p.
- Muñoz-Iniestra, D., F. G. López, M. M. Hernández, A. A. Soler y G. J. López. 2009. Impacto de la pérdida de la vegetación en las propiedades de un suelo aluvial. *Terra Latinoamericana*. 27 (3): 237-246.
- Muñoz-Iniestra, D. J., F. G. López; A. A. Soler, y M. M. Hernández. 2013. Edafología: Manual de métodos de análisis del suelo. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. UNAM. México
- Muñoz-Iniestra, D. J., M. Ferreira, I. B. Escalante y J. López. 2013. Relación entre la cobertura del terreno y la degradación física y biológica de un suelo aluvial en una región semiárida. *Terra Latinoamericana*. 31 (3): 201-210.
- Muñoz-Iniestra, D. J., M. Chávez, H. O. Godínez y N. A. Cuéllar. 2017. Cambios edáficos en islas de fertilidad y su importancia en el



funcionamiento de un ecosistema del valle de Tehuacán Puebla, México. *Terra latinoamericana*. 35 (2): 123-133.

- Navarrete, A., G. Vela, J. López y M. de L. Rodríguez. 2011. Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS* 80. 29-37.
- Navarro, A., B. Figueroa, M. Martínez, F. González y E. Salvador. 2008. Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos. *Agricultura Técnica en México*. 34 (2):151
- 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
- Paz, M. J., J. Sánchez y 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.
- Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero. 2003. *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. 3er ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Porta, J., M. López- Acevedo y R. M. Poch. 2013. *Edafología. Uso y protección de los suelos*. Mundi- Prensa. 608 p.
- Prieto-Méndez, J., F. Prieto- García, O. Acevedo-Sandoval y M. Méndez-Marzo. 2013. Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del estado de Hidalgo, México. *Agronomía Mesoamericana*. 24 (1): 83-91.
- Riginos C. y J. Herrick, 2010. Monitoring rangeland health: A guide for pastoralist communities and other land managers in Eastern Africa Version II. Nairobi, Kenya: ELMT-USAID/East Africa.
- Rzedowsky, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa. México, D. F.
- Sánchez-Marañón, M., M. Soriano, G. Delgado y R. Delgado. 2002. Soil quality in Mediterranean mountain environments: effects of land use change. *Soil Science Society of America Journal*. 66:948
- Segnestam, L. 2002. Indicators of Environmental and Sustainable Development. Theories and Practical Experience. *Environmental Economic Series*.89:61



- SEMARNAP. 1999. Superficie continental e insular del territorio nacional. Subsecretaría de Recursos Naturales. INEGI, México.
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-01-RECNAT-2000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. Segunda sección. México. 73 p.
- Singer, M.J. y S. Ewing. 2000. Soil Quality. *Handbook of Soil Science. Chapter 11* (ed. Sumner, M. E.), 271-298, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- SQI-Soil Quality Institute. 1996. Indicators for soil quality evaluation. USDA natural resources conservation service. The National Soil Survey Center / The Soil Quality Institute, NRCS, USDA / The National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
- SUMAMAD (Sustainable Management of Marginal Drylands). 2014. Drylands. Sustaining Livelihoods and Conserving Ecosystem Services. The United Nations University. Ontario, Canada.
- USDA. 1984. Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples. Soil Survey Investigation Report No. 1. Soil Conservation Service. Washington, D.C
- USDA. 1999. Soil Quality Test Kit Guide. United States Dept. of Agriculture, Agricultural Research Services, Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Institute. 80 p.
- Valiente-Banuet, A., L. Solís, P. Dávila, M. C. Arizmendi, C. Silva Pereyra, J. Ortega-Ramírez, J. Treviño Carreón, S. Rangel-Landa y A. Casas. 2009. Guía de la vegetación del Valle de Tehuacán–Cuicatlán. Primera edición. México.
- Villani, M., L. Alle, A. Díaz y P. Robbins. 1999. Adaptative strategies of edaphic arthropods. *Annual Reviews Entomology*. 44:233
- Villareal-Núñez, J., I. Pla-Sentis, L. Agudo-Martínez, J. Villaláz-Pérez, F. Rosales y L. Pocasangre. 2013. Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. *Agronomía Mesoamericana*. 24 (2): 301-315.
- Weil, R., K. R. Islam, M. A. Stine, J. B. Gruver y S. E. Samson-Liebig. 2003. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*. 18(1): 3-17.



- Wilson, M. G., C. E. Quintero, N. G. Boschetti, R. A. Benavidez y W. A. Mancuso. 2000. Evaluación de los atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad en Entre Ríos. *Rev. Facultad de Agronomía*. 20 (1):23-30.
- Yilmaz, E. 2011. Effects of Different Sources of Organic Matter on Some Soil Fertility Properties: A Laboratory Study on a Lithic Rhodoxeralf from Turkey. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 42: 962-970.
- Zar J. 1999. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall. New Jersey.