



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA**

**ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE EL TIPO DE  
COBERTURA VEGETAL O USO DE LA TIERRA Y EL  
CONTENIDO Y DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN UN  
SUELO DEL VALLE DEL MEZQUITAL, HGO.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**BIÓLOGA**

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

**JESSICA MARIELA GONZÁLEZ SOLÍS**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. DANIEL J. MUÑOZ INIESTRA**

**2014**



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.

Mucho mejor atreverse a hacer cosas grandes, a obtener triunfos gloriosos, aun cuando matizados con fracasos, que formar en las filas de aquellos pobres de espíritu que ni gozan mucho ni sufren mucho porque viven en el crepúsculo gris que no conoce la victoria ni la derrota.

*Theodore Roosevelt*

## **DEDICATORIA**

A mi más grande amor y orgullo. A mi hormi, a mi bicho, a mi Mamá. Gracias no solo por darme la vida, si no por acompañarme en ella. Gracias por tu amor y sobre todo por tu paciencia (porque sabemos que no es cosa fácil soportarme),

**GRACIAS POR TODO MAMÁ!!!!**

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Daniel J. Muñoz Iniestra por dirigir esta tesis, por su ayuda y apoyo incondicional, por su confianza y grandes enseñanzas, por apoyarme en el trabajo diario.

Al M. en C. Francisco López Galindo por enriquecer mi trabajo y formación como bióloga. Por todas las aportaciones que mejoraron esta tesis.

Al Biol. Arnulfo Reyes Mata por encaminarme en el mundo de la cartografía, por sus consejos, observaciones y aportaciones para mejorar este trabajo. ¡Gracias por tu paciencia!

Al Dr. Héctor O. Godínez Álvarez por haber revisado mi tesis y sobre todo por su asesoría en la parte estadística.

Al Dr. Diodoro Granados Sánchez por haber revisado mi trabajo y por las contribuciones que hizo a él.

A mis amigos: Aleida, Cynthia, Cabañas, Denisse, Daniel, Erendira, Frodo, Jhon, Julián, Karen, Leslie, Moni, Phanita y Rod, por estar conmigo en las buenas, en las malas y en las peores. Por las risas que me han arrancado y los buenos momentos que me permitieron gozar a su lado. Por su amistad y confianza. Los quiero!!!

Y de manera muy especial a la FES Iztacala por ser mi escuela, mi casa y mi superación.

# CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
2.1	Objetivo General: .....	3
2.2	Objetivos Particulares: .....	3
<b>3</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
3.1	Relación Suelo-Agua.....	4
3.1.1	Capacidad hídrica del suelo .....	4
3.1.2	Estado energético del agua .....	5
3.1.3	Formas de agua en el suelo .....	6
3.2	Relación Suelo-Agua-Planta .....	7
3.3	La Salinidad en el Suelo.....	7
3.3.1	Fuentes de sales solubles .....	8
3.3.2	Salinización de los Suelos .....	8
3.3.3	Características de los suelos salinos y sódicos .....	8
3.3.4	Efecto de la salinidad en el desarrollo vegetativo .....	9
<b>4</b>	<b>ANTECEDENTES</b> .....	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>13</b>
5.1	Área de estudio .....	13
5.1.1	Clima .....	14
5.1.2	Fisiografía .....	14
5.1.3	Geología .....	15
5.1.4	Suelos.....	15
5.1.5	Vegetación.....	16
5.1.6	Hidrología .....	16

5.2	Sitios de muestreo.....	17
5.3	Toma de muestras .....	18
5.4	Análisis de las muestras.....	19
5.5	Análisis de los datos.....	20
<b>6</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>21</b>
6.1	Retención de humedad .....	21
6.1.1	Agua aprovechable del suelo, en las distintas coberturas o usos del terreno.....	21
6.1.2	Relación Agua/Aire .....	24
6.1.3	Infiltración .....	29
6.1.4	Distribución del agua aprovechable a diferentes profundidades del perfil edáfico en diferentes coberturas o usos del terreno. ....	31
6.2	Salinidad .....	31
6.2.1	Distribución de la salinidad y sodicidad del suelo bajo diferentes usos y coberturas.....	33
6.2.2	Relación entre la distribución del agua y el grado de salinidad con las distintas coberturas evaluadas. ....	40
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>42</b>
<b>8</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>44</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>45</b>

## RESUMEN

El suelo ofrece a los ecosistemas y, en particular al crecimiento y desarrollo de las plantas, la capacidad de almacenar y proveer agua (Shachak *et al.*, 1998). En las regiones semiáridas, la proporción de la biomasa vegetal depende en mayor medida de la cantidad y distribución espacial de la humedad, cuya variación a su vez está determinada principalmente por efectos del clima, características físicas y químicas del suelo, así como por el uso y manejo del terreno (Breshears & Barnes, 1999). El cambio de uso de suelo y las malas prácticas de manejo de la tierra, han deteriorado progresivamente muchas zonas agrícolas y de vegetación natural. Particularmente, el uso de agua residual para riego, ha incrementado el problema de salinización del suelo, repercutiendo negativamente en la productividad del ecosistema (Villavicencio *et al.*, 2011). Es por esto, que el objetivo de este trabajo fue evaluar el funcionamiento hídrico y la variación de la salinidad del suelo en distintos usos o coberturas de terreno. El estudio se realizó en la localidad del Durazno, Hgo., donde se seleccionaron cuatro diferentes coberturas: matorral cerrado (MC), mezquital abierto (MA), matorral halófito (MH) y una parcela agrícola (A). Los resultados revelaron, que la cantidad de agua aprovechable (HA) no presentó diferencias significativas entre los distintos sitios, sin embargo, se pudo determinar que A fue el sitio que más agua almacenó, en comparación a MA, que fue el que menos retuvo. La salinidad y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) presentaron diferencias significativas entre los distintos sitios. MH y MC fueron los sitios que mostraron el mayor grado de salinidad y sodicidad, por el contrario, A no tiene problema alguno en ese sentido. Finalmente, se pudo concluir, que la cantidad de HA en el suelo está fuertemente vinculada con el porcentaje de materia orgánica, arcillas y densidad aparente. Mientras que, salinidad y sodicidad, está relacionada con el impacto de las prácticas de manejo y con los procesos de evapotranspiración.

## 1 INTRODUCCIÓN

Una de las principales funciones que el suelo ofrece a los ecosistemas y, en particular al crecimiento y desarrollo de las plantas, es la capacidad de almacenar y proveer agua. La relación de las propiedades del suelo con el movimiento y almacenamiento del agua es muy compleja, sin embargo, muchas veces la estimación de la variabilidad espacial de la humedad del suelo puede ser inferida cualitativamente a partir de diferentes propiedades edafológicas (Acuña y Poch, 2001). Por lo cual, los cambios en el funcionamiento hídrico del suelo son consecuencia de interacciones de lo que ocurre en la superficie, de las características de las plantas y del uso de la tierra (Duniway *et al.*, 2010).

Por otro lado, la vegetación constituye el principal factor de vida en la tierra; es la base de la cadena alimentaria y el mayor transformador de sustancias que existe. La presencia de vegetación en los sistemas terrestres, depende de la relación entre el suelo, el agua y la atmósfera. El agua constituye más del 70% de las plantas, el suelo le sirve de sustento y proveedor de nutrientes y la atmósfera controla el suministro de agua, energía, oxígeno, nitrógeno y CO<sub>2</sub> (Prieto, 2004).

Breshears & Branes, (1999) mencionan que en las regiones semiáridas, la proporción de la biomasa vegetal depende de la cantidad y distribución espacial de la humedad del suelo, de tal forma que la proporción de la cobertura leñosa aumentará a medida que se incremente la humedad en las capas más profundas del suelo y viceversa, el número de plantas herbáceas se incrementará cuando la humedad del suelo se concentre principalmente en las capas superficiales. Este planteamiento, se basa en las diferencias que puede haber en la distribución espacial de la humedad del suelo (vertical y horizontal), así como en las diferencias y eficiencia de cada especie para extraer el agua del suelo.

La disponibilidad de agua para las comunidades vegetales, depende a su vez, de las características del clima, relieve y propiedades físicas del suelo tales como; la porosidad, conductividad hidráulica y capacidad de retención hídrica (Shachak *et al.*, 1998; Prieto, 2004). De tal modo que, la disminución de la cubierta vegetal de

una zona, generalmente se asocia a la reducción en la capacidad de retener agua por parte del suelo (Breshears & Branes, 1999). Sin embargo no es el único factor que reduce la producción de un ecosistema. En las regiones áridas y semiáridas, la salinidad es un factor que perjudica severamente a los componentes bióticos del ecosistema, especialmente a la vegetación (Villavicencio *et al.*, 2011).

De acuerdo a esto, Quintana *et al.*, (2005) mencionan que son dos los problemas fundamentales que la salinidad causa a las plantas. En primer lugar, el efecto de estrés hídrico ocasionado por la disminución del potencial osmótico del medio de enraizamiento y por otro lado la toxicidad iónica y el desbalance nutricional.

Particularmente, Ramírez *et al.*, (2002) encontraron que para el Valle del Mezquital, las prácticas de manejo, el cambio de uso de suelo y el uso de aguas residuales, son factores que favorecen la salinización de los suelos y la del agua subterránea del Valle. El uso prolongado de agua residual, modifica el régimen hidrogeológico, en especial la recarga y el reflujó del agua subterránea, favoreciendo la formación de un manto acuífero somero (Cortes, 2011). Cuando la capa freática se eleva hasta 1.50-1.80 m de la superficie del suelo, el agua subterránea se mueve hacia arriba, llegando a la zona radicular del cultivo y a la superficie del suelo; en tales condiciones, el agua del suelo y la de riego contribuyen a la salinización del suelo (Richards, 1990).

Por todo lo anterior, el presente trabajo pretende conocer si existe algún grado de relación entre el tipo de cobertura vegetal o uso de la tierra, con la capacidad de retención y almacenamiento del agua y el grado de salinidad en un suelo del Valle del Mezquital Hgo

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

- Evaluar el funcionamiento hídrico y la variación de la salinidad del suelo en distintos tipos de uso o coberturas de terreno.

### **2.2 Objetivos Particulares**

- Calcular la cantidad de agua aprovechable del suelo a diferentes profundidades de un perfil edáfico, bajo diferentes coberturas o usos del terreno.
- Valorar la distribución vertical de sales del suelo bajo distintas coberturas.
- Conocer si hay relación entre la distribución vertical del agua y el grado de salinidad del suelo en las distintas coberturas de terreno.

### **3 MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 Relación Suelo-Agua**

La relación suelo-agua se refiere a las propiedades físicas de los suelos que afectan el movimiento, la retención y uso del agua por parte de las plantas. El conocimiento de esta relación puede permitir la elaboración de un adecuado plan de riego, lo que incidirá en el buen uso de todas las condiciones dadas en un área determinada en función de los cultivos que ahí se desarrollen (Velarde, 2007).

El agua es uno de los constituyentes más variables del suelo y su distribución, depende de los aportes hídricos como la lluvia o el riego, de la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo y del estado energético del agua.

Al producirse una precipitación, una parte del agua se evapora antes de llegar al suelo, otra es interceptada por la vegetación y otra logra llegar al suelo. La precipitación efectiva, al llegar al suelo, tiende primero a humedecerlo, y aquella que no corre por la superficie va infiltrarse a través del sistema poral del suelo. De la infiltración total, una parte se percola a las capas profundas, contribuyendo a formar las capas acuíferas; otra parte es aprovechada por la vegetación, y una tercera parte se evapora del suelo por acción de la capilaridad o a través de las plantas por el proceso de evapotranspiración.

##### **3.1.1 Capacidad hídrica del suelo**

La capacidad del suelo para almacenar agua, es una de las principales funciones que el suelo ofrece a los ecosistemas y en particular al crecimiento y desarrollo de las plantas. El suelo constituye un almacén natural de agua, sin embargo no toda el agua en él es asimilable para la vegetación. Del total del agua que se queda retenida en el suelo, la parte se encuentra entre el coeficiente de marchitez y el coeficiente higroscópico, se considera como no aprovechable por las plantas, en el límite crítico del agua capilar. Por su parte, la parte que se encuentra fuera de este límite, es el agua realmente útil para la vegetación, la cual está determinada

por la capacidad de campo y el punto de marchites permanente (Figura 1; Prieto, 2004; Leiton, 1985).

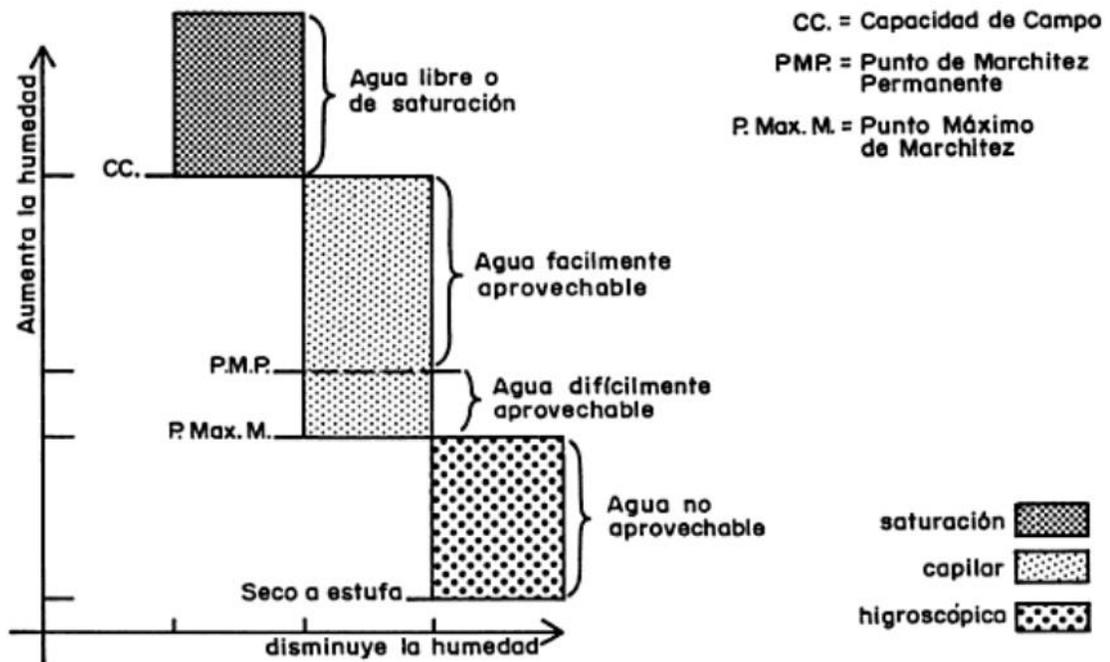


Figura 1. Clases de agua en el suelo y su relación con las constantes de humedad. (Leiton, 1985)

La estimación de la variabilidad espacial de la humedad del suelo puede ser inferida cualitativamente a partir de diferentes propiedades edafológicas (Acuña y Poch, 2001), tales como; capacidad de campo, punto de marchitez permanente, capacidad de infiltración, permeabilidad, transpiración y evapotranspiración (Prieto, 2004; Velarde, 2007; Richards *et al.*, 1990).

### 3.1.2 Estado energético del agua

El estado energético del agua, nos permite saber si el agua se encuentra en equilibrio o en movimiento, el cual depende de la atracción de la fase sólida, de la concentración de sales y de la temperatura del suelo (Velarde, 2007).

El potencial hídrico en el suelo es la energía con que el agua se encuentra retenida en él y depende de distintas fuerzas que actúan sobre ella, tanto las que

la retienen como las que tienden a desalojarla (fuerza de gravedad, de adsorción, de adhesión y de capilaridad) (Porta *et al.*, 2003).

El agua es retenida en el suelo mediante la energía de tensión, influenciada por las fuerzas de adhesión y cohesión. Las fuerzas de adhesión y cohesión se refieren a la fuerza de atracción del suelo hacia las moléculas de agua y a las moléculas de agua entre sí (Velarde, 2007).

### 3.1.3 Formas de agua en el suelo

En el suelo se encuentran tres tipos o formas de agua, que se identifican después de que se aplica agua, sea por medio natural o artificial (Velarde, 2007).

El agua libre o de gravitación es aquella que se moviliza en el suelo bajo los efectos de la gravedad, y por lo cual puede llegar hasta capas muy profundas. En términos generales, el agua de gravitación influye directamente en la presencia y profundidad del nivel freático (Leiton, 1985).

Después de haber alcanzado un estado de saturación y un periodo de drenado, el agua que queda almacena en los microporos del suelo, es conocida como agua capilar, la cual es aprovechable casi en su totalidad por las plantas (Prieto, 2004).

Finalmente, si se permite que el agua capilar se reduzca a niveles en que el cultivo no pueda absorberla se llega al agua higroscópica. El agua higroscópica se caracteriza porque es fuertemente retenida por las partículas de suelo y se mueve en forma de vapor (Velarde, 2007).

Cabe mencionar, que el movimiento de las diferentes formas de agua en el suelo está sujeto a la acción de la gravedad, fuerza capilar y a la variabilidad en los gradientes de temperatura (Prieto, 2004; Palmer y Troeh, 1979)

### **3.2 Relación Suelo-Agua-Planta**

La relación suelo-planta se centra en la productividad del ecosistema, sin embargo también sirve como indicador de la distribución de la humedad del suelo (Escamilla *et al.*, 2005; Breshears & Barnes, 1999).

En esta relación, el suelo desempeña un papel muy importante en el desarrollo de la vegetación, pues además de servirle de sustento y proveerle nutrientes, su capacidad hídrica, es determinante en el desarrollo de las especies. Sin embargo, en ciertos casos, la persistencia a largo plazo de una especie, dentro de condiciones edáficas particulares, conlleva un rango de características que dependen más de la especie vegetal (plasticidad morfológica y fisiológica), que de las características edáficas en sí (Escamilla *et al.*, 2005). En este sentido, el sistema radicular de cada especie, juega un papel muy importante en la obtención de agua aprovechable (Leiton, 1985).

Si bien, el agua es muy importante en el desarrollo de la vegetación, la cobertura vegetal es determinante en la estabilidad hídrica del suelo; ya que la hojarasca, que esta provee, permite que los aportes hídricos sean absorbidos por las capas superficiales del suelo y quede disponible para las plantas. Cuando los aportes orgánicos disminuyen, también lo hace la infiltración (Shachak *et al.*, 1998).

### **3.3 La Salinidad en el Suelo**

Existen diversos tipos de estrés ambiental, los cuales afectan los cultivos o áreas de vegetación natural. La sequía, la salinidad y las temperaturas extremas son los principales tipos de estrés que causan efectos adversos en el crecimiento y productividad de los cultivos. En particular, la salinidad es un problema muy común en zonas áridas y semiáridas, que puede provocar áreas improductivas y que se expresa como la cantidad de sales disueltas en un volumen de solución (g/l) y está dado por el valor de conductividad eléctrica (Villavicencio *et al.*, 2011).

### 3.3.1 Fuentes de sales solubles

Las sales solubles son las que mayormente afectan la calidad del suelo, consisten principalmente en cationes de sodio, ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^+$ ), y de los aniones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^-$ ) y nitrato ( $\text{NH}_4^-$ ) (Richards, 1990).

La principal fuente de sales solubles son los minerales primarios que se encuentran en los suelos y en las rocas expuestas de la corteza terrestre, los cuales son liberados mediante diferentes procesos de intemperización química (hidrólisis, oxidación, carbonatación, entre otros).

Otras fuentes, son las sales que se originan en el océano por el choque de las olas con las costas y las sales de origen fósil, comúnmente liberadas por el agua superficial o subterránea en forma natural. Por último, tenemos las de origen antropogénico, las cuales se forman de desechos industriales, tales como;  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$  y  $\text{O}_3$ . Los iones que comúnmente se solubilizan mediante los procesos anteriores son:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{NH}_3^-$  y  $\text{HCO}_3^-$  (Salas, 2003).

### 3.3.2 Salinización de los Suelos

La acumulación de sales solubles en el suelo se debe a varios factores como: influencia del material parental, drenaje deficiente, uso de agua de riego de mala calidad o exceso en el uso de fertilizantes. De manera particular, el uso intensivo o las recargas de agua, provocan la elevación de la capa freática. Cuando la capa freática se eleva hasta 1.50-1.80 m de la superficie del suelo, el agua subterránea se mueve hacia arriba, llegando a la zona radicular del cultivo y a la superficie del suelo; en tales condiciones, el agua del suelo y la de riego contribuyen a la salinización del suelo (Richards, 1990).

A su vez, la calidad química del agua de riego, es determinante en el proceso de salinización de los suelos de una región. Cabe resaltar que el agua de riego puede contener de 0.1 a 5 toneladas de sal por hectárea en una lámina de 30 cm de

agua y la aplicación anual de ésta puede llegar hasta 1.50 m o más. De esta manera en períodos de tiempo relativamente cortos pueden agregarse a los suelos cantidades considerables de sales solubles (Villavicencio *et al.*, 2011; Richards, 1990).

### 3.3.3 Características de los suelos salinos y sódicos

Los suelos salinos, también llamados álcali blancos o Solonchaks (Richards, 1990). Son aquellos en los cuales la conductividad eléctrica (C.E.) del extracto de saturación es  $\geq 4$  dS m<sup>-1</sup>, el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) <15%, la relación de adsorción sodio (RAS) <13 y el pH <8.5 (Donald, 2003). Por lo general, presentan manchas blancas, en especial, en la temporada de sequía. Los tipos de sales que presentan pueden ser cloruros, sulfatos y carbonatos de calcio, magnesio y sodio (Mesa, 2003; Muñoz *et al.*, 2011).

Los suelos sódicos, presentan un pH que varía de 8.5 a 11, un PSI >15%, una CE <4 dS m<sup>-1</sup> y el límite inferior del extracto de saturación RAS es de 13. En estos suelos, la concentración de sodio causa la dispersión de la materia orgánica y de las partículas del suelo, como consecuencia, el agua no se mueve, por lo que el suelo puede permanecer inundado durante mucho tiempo (Donald, 2003; Muñoz *et al.*, 2011).

Los suelos salino-sódicos, presentan un valor de CE  $\geq 4$  dS m<sup>-1</sup> y un PSI  $\geq 15\%$ , el pH es variable, cuando es <8.5 hay una mayor presencia de sales y cuando es >8.5 hay mayor cantidad de sodio. La RAS en estos suelos es mínimo de un valor de 13 (Donald, 2003). Estos suelos corresponden a los llamados “álcali negro” y, en ciertos casos, a los “Solonetz” (Richards, 1990).

### 3.3.4 Efecto de la salinidad en el desarrollo vegetativo

El estrés salino tiene dos componentes que afectan el crecimiento vegetal, el osmótico y el iónico. La elevada concentración salina provoca una disminución del potencial osmótico del medio de crecimiento y, en consecuencia, de su potencial

hídrico; la toxicidad iónica está asociada con un desequilibrio nutricional debido a la interferencia de los iones salinos con la absorción de los nutrientes esenciales que requiere la planta (Villavicencio *et al.*, 2011).

Existen diversos daños entre las diferentes especies provocados por la salinidad. En el caso de la semilla, se reduce su velocidad de germinación, debido al efecto osmótico, lo cual afecta ciertos procesos fisiológicos como la fotosíntesis y la conductancia estomática (Parés *et al.*, 2008; Villavicencio *et al.*, 2011). Sin embargo, las plantas hacen uso de mecanismos que les permiten continuar con sus funciones vitales en este tipo de ambientes, entre éstos se pueden considerar la dilución de las sales o la eliminación de estas últimas a través de glándulas o tricomas secretores, absorción selectiva de iones por las raíces, restricción del transporte hacia órganos vitales, entre otros (Quintana *et al.*, 2012).

#### 4 ANTECEDENTES

Breshears & Barnes, (1999) estudiaron la relación entre distintos tipos de vegetación y la humedad del suelo para paisajes semiáridos, determinando un nuevo modelo conceptual. Este modelo proporciona información acerca de la interdependencia que tienen los distintos tipos de plantas (herbáceas, arbustivas y leñosas) con la distribución tanto vertical como horizontal de la humedad del suelo. Por otra parte, este modelo se puede aplicar para proporcionar información sobre los efectos combinados o individuales del cambio climático y/o uso de la tierra en las comunidades vegetales semiáridas.

Stratton *et al*, (2000) caracterizaron la repartición espacial y temporal de los recursos hídricos del suelo entre siete especies de un bosque seco de las tierras bajas de Hawaii, para conocer si las diferencias en la repartición del agua en el suelo eran consistentes con la repartición arbórea del bosque. Los patrones de la repartición del agua en el suelo y las plantas fueron inferidos a través del isotopos de hidrógeno estables. Los autores encontraron que las dos especies dominantes *Diospyros* y *Nestegis sandwicensis* obtienen el agua de las capas superficiales del suelo y que los patrones de distribución del agua son consistentes con la alta diversidad de especies leñosas en este ecosistema de Hawaii.

Salcedo *et al*, (2007) estudiaron la relación existente entre la humedad aprovechable con la materia orgánica y la superficie específica del suelo. Encontrando que la humedad aprovechable varió por el tipo de suelo y por el impacto de las prácticas agrícolas. Determinaron que el porcentaje de materia orgánica está fuertemente relacionado con la cantidad de agua aprovechable que el suelo puede almacenar, ya que la producción de la biomasa vegetal modifica la dinámica de las reservas orgánicas de cada sitio.

Yimer *et al*, (2007) evaluaron el efecto de diferentes tipos de uso de suelo sobre la capacidad de infiltración en una cuenca en las tierras altas de Etiopía. Los resultados mostraron que las tierras cultivadas y de pastoreo comparadas con las

del bosque, tienen una capacidad de infiltración y de contenido de humedad 70 y 45% menor respectivamente y que la densidad aparente fue más alta en las primeras dos que en la última. Concluyeron que la disminución de la capacidad de infiltración y el contenido de humedad del suelo está causado por cambios en la estructura y compactación superficial del suelo, provocados por las actividades de labranza y pastoreo, así como por la conversión del uso de suelo que se ha venido dando en la zona.

Torres y Acevedo, (2008) trabajaron sobre el problema de la salinidad en los cultivos de los Valles de Lluta y Azapa en el Norte de Chile. Ellos concluyeron que la salinidad del agua de riego está íntimamente relacionada con la salinidad de los suelos de los valles, afectando los cultivos que en ellos se realizan. Para el caso del valle de Lluta la salinidad de los suelos se hace manifiesta en el sector del valle que tiene problemas de drenaje. En Azapa, la salinidad del agua de riego es inferior a la de Lluta, pudiéndose cultivar una mayor variedad de cultivos con rendimientos muy superiores a los del valle de Lluta.

Wesseling *et al*, (2009) determinaron el efecto de la textura del suelo y materia orgánica en el comportamiento hidrológico de los suelos de textura gruesa. Los resultados mostraron que la cantidad de agua total disponible se incrementa mediante la adición de materia orgánica entre el 144% (textura ligeramente gruesa) y 434% (textura muy gruesa).

Villavicencio *et al*, (2011) estudiaron los efectos de la salinidad en el desarrollo vegetativo de diversos cultivos, encontrando que las características del clima, el suelo y la calidad química del agua de riego, son las que determinan el proceso de salinización de los suelos en una región. Esto, puede conducir a efectos adversos e irreparables, ya que las respuestas de los cultivos van desde necrosis hasta pérdida del crecimiento.

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Área de estudio

La zona de estudio se encuentra dentro del municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, en la localidad denominada el Durazno que se ubica entre los paralelos  $20^{\circ} 31' 22.98''$  de latitud norte y  $99^{\circ} 13' 8.73''$  longitud oeste, con un rango de altitud de 1721 msnm (INEGI, 1981) (Fig.2).

Políticamente, forma parte del municipio de Ixmiquilpan, en la zona conocida como el Valle del Mezquital. El Valle del Mezquital se localiza en la parte sur-occidental del estado de Hidalgo dentro del Valle de Tula, en lo alto del Altiplano Mexicano y se extiende en una cuenca que colinda al sur con el Valle de México aproximadamente a 100 Km (Jiménez *et al.*, 2004).

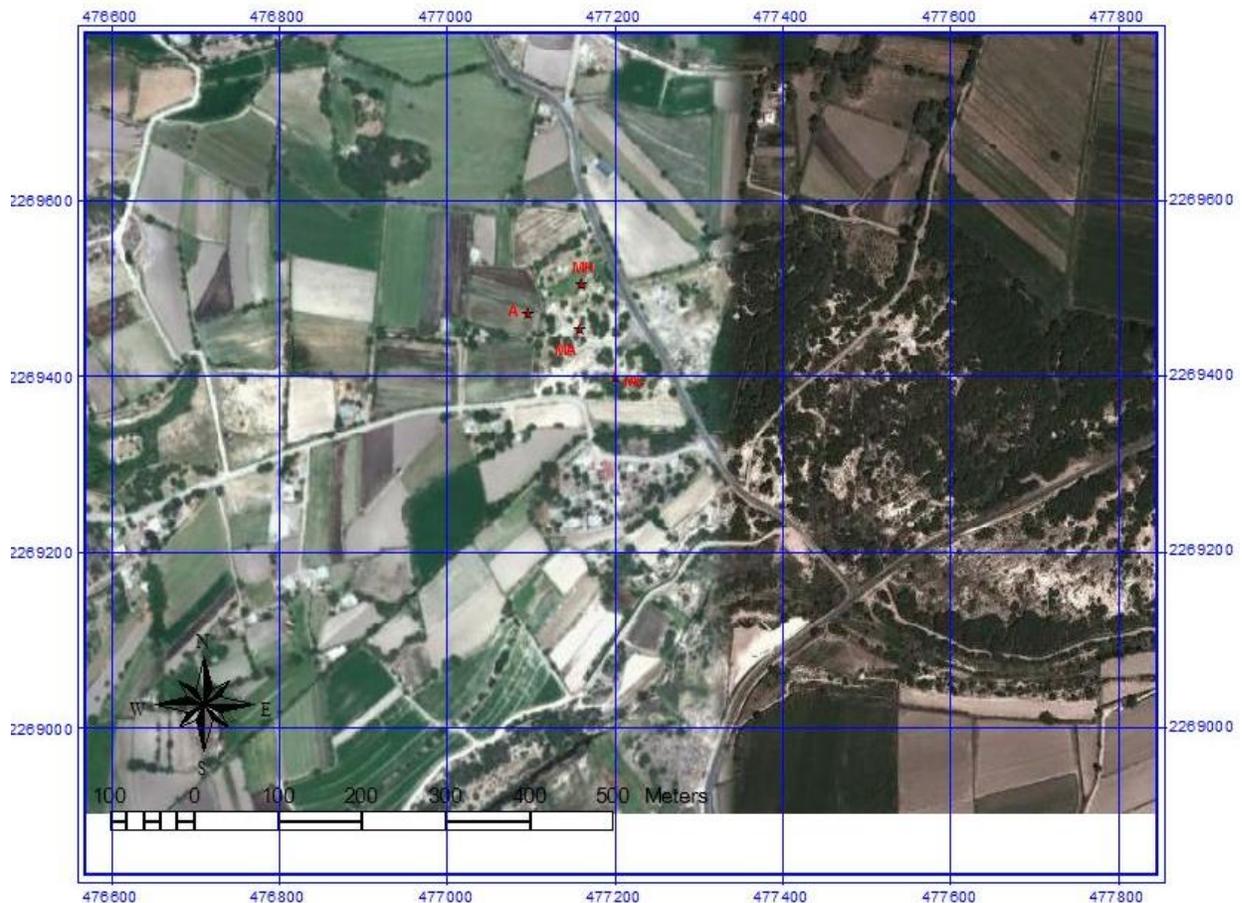


Figura 2. Localización del área de estudio: El Durazno Ixmiquilpan, Hgo. Fuente.

Google Earth

### 5.1.1 Clima

El tipo de clima localizado dentro del área de estudio, pertenece a una zona árida, y es de un tipo BSoHW" (w) (e)g, correspondiente a un semiseco estepario con temperaturas mayores a los 18° C, con el mes más seco en invierno y el más caliente antes del solsticio de verano. En los meses más calurosos se registran temperaturas de 36° C y en los más fríos hasta de -2° C (Vázquez, 2012). La precipitación anual fluctúa entre los 400 y 450 mm, con lluvias en verano. La mayor precipitación suele presentarse de mayo a septiembre, coincidiendo con la época calurosa; la temporada de menor precipitación ocurre durante enero y febrero. (Segerstrom, 1962; Jiménez *et al.*, 2004). En general, en todo el valle se presentan variaciones climáticas que se manifiestan en los tipos de vegetación (Segerstrom, 1962).

### 5.1.2 Fisiografía

El área de estudio pertenece a las provincias fisiográficas del eje Neovolcánico y de la Sierra Madre Oriental. Las tres principales cadenas montañosas de la zona son la Sierra de Pachuca en el este, la Sierra de Juárez en el norte, y la Sierra de Xinthé en la parte occidental. El Valle se encuentra limitado hacia el norte por las elevaciones montañosas de Juárez y Santuario, las cuales separan al valle de la vertiente del Río Amajac (Amacuzac) hacia el norte. Hacia el noreste el valle está limitado por las estribaciones de la Sierra Madre Oriental que principia por el Cerro de Cuxmaye y lo sucede el Cerro Hundri el cual se prolonga hacia el sur-este y se entrelaza con la Sierra de los Frailes (Órganos de Actopan) la cual separa por el noreste la Cuenca del Mezquital de las vertientes de los ríos de San Andrés Tonicapa y San José (Díaz, 1936; Segerstrom, 1962).

Hacia el oeste el valle queda limitado por las estribaciones sudoccidentales del Cerro de Juárez y la Serranía que se prolonga hacia el sur en la que se distinguen los Cerros de Oreja Desnit, Picudo, Dado, Pilón y Mixquiahuala, los cuales, separan al Valle del Mezquital por el oeste de la cuenca de San Juan del Río (Díaz, 1936).

### 5.1.3 Geología

La zona de estudio se compone en su mayoría de rocas volcánicas y sedimentos del Cenozoico, específicamente del dominio del Terciario Superior. Las rocas que se pueden encontrar son; areniscas, conglomerados y algunas capas de lutitas arenosas (Cervantes y Armienta, 2004; Delgado, 2000).

La mayor de los materiales geológicos de la zona, provienen de la formación “Tarango”, formada por material clástico de ceniza volcánica, que se encuentra disperso en la mayor parte del Valle y por material aluvial y rocas calcáreas acumuladas durante el relleno de amplios valles en la parte centro del país. Esta unidad se formó por el transporte de corrientes de aguas superficiales, mismas que acumularon gravas, arenas, limos y arcillas en lagos someros, abarcando extensiones considerables (Seegerstrom, 1962; Cortes, 2011 y Vázquez, 2012).

### 5.1.4 Suelos

Las unidades edafológicas predominantes para el área de estudio son Feozem Calcárico y Háplico. El uso de este tipo de suelo es principalmente agrícola; sin embargo, cuando se encuentran sobre relieves accidentados sostienen matorrales tipo crasicaule y espinoso. También se pueden encontrar unidades del tipo Luvisol Plíntico. Los Luvisoles, se caracterizan por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo, se destinan principalmente para la agricultura con rendimientos moderados, sin embargo se debe tener en cuenta que son suelos con alta susceptibilidad a la erosión.

De acuerdo a los informes de Muñoz y López (1986. 87 y 88), se tiene que los suelos de la zona son algo diversos y jóvenes. Los factores que más han incidido en su génesis son: el clima, sustrato geológico y relieve (Delgado, 2000).

### 5.1.5 Vegetación

La región de estudio está situada en una zona de transición con gran variedad de ecosistemas, climas y relieves, por lo que puede ser considerada como un corredor biológico con numerosas especies vegetales (Vázquez, 2012). Variantes altitudinales y fisiográficas influyen de manera decisiva en el establecimiento de variadas formas de vida e incide en el desarrollo de una gran riqueza específica, generando mosaicos vegetacionales que representan un gran potencial de recursos para la zona (López, 2001).

De manera particular, para la zona de estudio, la vegetación natural dominante es de tipo matorral espinoso donde *Prosopis laevigata* es la especie dominante, aunque ésta se encuentra sólo como pequeños manchones inmersos entre parcelas agrícolas.

El uso del suelo para la localidad del Durazno es principalmente pecuario, forestal y para la agricultura (riego). En cuanto a las zonas dedicadas a la agricultura, los cultivos de maíz y alfalfa representan el 60 y 80% de ellos. En segundo término se cultiva avena, cebada, frijol y en menor proporción trigo y hortalizas (Granados *et al.*, 2004).

### 5.1.6 Hidrología

La zona de localiza dentro de la región Hidrológica 26, denominada del Pánuco, y en una de las subcuencas del Río Tula, la cual tiene sus orígenes en el cerro La Bufa, donde se le conoce como río Tepeji, fluye de sur a norte, hasta que sus escurrimientos son encontrados por la presa Taxhimay, pasa por la inmediaciones de la población del mismo nombre y poco después es controlado por la presa Requena. Aguas abajo recibe aportaciones del río Salto, que a su vez recibe importantes volúmenes de aguas residuales provenientes del emisor central del drenaje profundo de la Ciudad de México.

El río tula sigue su cauce y descarga en el vaso de almacenamiento de la presa Endhó, para su posterior aprovechamiento en el distrito de riego No. 100. En este tramo el río tula recibe aportaciones de los ríos Tlautla y Rosas. Poco después cambia rumbo al noreste para llegar a Mixquihuala y Progreso de Obregón, y otra vez cambiar de rumbo hacia el norte, pasar por Chilcuautila, Tlacotlapilco e Ixmiquilpan hasta su confluencia con el río Actopan. Prosigue su curso y recibe a sus tributarios el río Alfajayucan y río San Juan, sitio donde cambia de nombre a río Moctezuma (Díaz, 1936; Arenal, 1985; Vázquez, 2012).

## 5.2 Sitios de muestreo

El sitio de muestreo es una unidad geomorfológica que corresponde a una planicie inclinada con algunos lomeríos ubicada en localidad del Durazno en el Alto Mezquital, es un área homogénea en cuanto a clima, relieve, litología y tipo de suelo, ahí se seleccionaron cuatro diferentes coberturas: Matorral Cerrado (MC), Mezquital Abierto (MA), Matorral Halófito (MH) y Parcela Agrícola (A).

En la cobertura del matorral cerrado predominaba como vegetación natural *Prosopis laevigata*. En el suelo, se percibían algunas costras de sal. En el Mezquital Abierto el suelo no tiene un uso en específico, la cobertura del suelo consiste en un mezquital abierto donde el interespacio entre los mezquites es predominantemente suelo desnudo y donde las costras de sal son muy evidentes. En el Interdosel crecen algunas herbáceas como; (*Heliotropium curassavicum* y *Ipomoea purpurea*). Por su parte en el Matorral Halófito domina la vegetación halófito, con aproximadamente un 10% de suelo desnudo, la pendiente del terreno fluctúa entre 1° y 2° %, las costras de sal también eran evidentes.

Finalmente, en la Parcela con agricultura de riego, se cultiva maíz (*Zea mays*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*). En los límites de la parcela crecen algunas herbáceas y malezas, tales como; *Sphaeralcea angustifolia* (hierba del negro), *Bothriochloa laguroides* (popotón o cola de zorro), *Sporobolus indicus*, y *Florestina pedata*, y algunas veces llega a crecer *Ricinus communis*. Cabe mencionar, que

de acuerdo con la ubicación y las condiciones de los terrenos, se realizan prácticas específicas de acondicionamiento, sin embargo en general las prácticas agrícolas son tradicionales. El uso de pesticidas se da dependiendo la magnitud de las infestaciones.



Matorral halófito (MH). Cobertura con dominancia de gramíneas, y vegetación halófito.



Mezquital abierto (MA). Interdosel desnudo, con algunos manchones de pasto halófito y costras de sal.



Parcela agrícola (A). Presenta cultivos de maíz y frijol.



Matorral cerrado (MC). Presenta vegetación natural (mezquites, pasto y algunas herbáceas).

Figura 3. Panorámicas de las cuatro coberturas donde se realizó la toma de muestras del suelo.

### 5.3 Toma de muestras

En cada una de las coberturas se eligieron tres sitios más o menos ubicados a la misma distancia (tratando representar toda la extensión del terreno), en cada uno de ellos con la ayuda de un barreno cilíndrico, se realizó una perforación

extrayendo muestras a cada 20 cm hasta llegar a una profundidad de 80 cm (Fig. 3), de tal modo que se tomaron cuatro muestras en cada sitio (0 - 20, 20 - 40, 40 - 60 y 60 - 80 cm), lo que al final nos representó un total de 48 muestras, las cuales se analizaron individualmente. Asimismo en cada uno de estos sitios se realizaron pruebas de infiltración por el método propuesto por la (USDA, 1999), empleando un anillo de PVC de 6" y evaluando el paso de dos láminas de agua de una pulgada. También en cada uno de estos sitios se tomaron muestras para evaluar la densidad aparente del suelo de acuerdo al procedimiento establecido por la (USDA, 1999).



Figura 4. Toma de muestras de suelos.

#### **5.4 Análisis de las muestras** (Tomados de Muñoz et al., 2011)

En el laboratorio se analizaron las siguientes propiedades edáficas: textura, método del hidrómetro (Desarrollado por Bouyoucos, 1962); densidad aparente (DA) por el método volumétrico o de la probeta (Beaver, 1963); densidad real (DR), método del picnómetro; materia orgánica (MO) por el método de oxidación de ácido crómico y ácido sulfúrico (Desarrollado por Walkley-Black, 1947); capacidad de campo (CC) por el método gravimétrico; la porosidad se calculó a

partir de los valores de DA y DR; el punto de marchitez permanente (PMP) se estimó a través del valor de la CC; la relación agua/aire se obtuvo a partir de los datos de DA y CC; mientras que el agua aprovechable (HA) se mide con los datos de la CC, PMP y DA.

También se midió el pH por el método potenciométrico; conductividad eléctrica (C.E), por el método de conductividad de Wheatstone; la salinidad se midió en base a la conductividad del extracto acuoso de saturación;  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{Na}^+$  solubles se midieron a partir de los extractos obtenidos de las pastas de saturación (Cheng y Bray, 1951);  $\text{Na}^+$  intercambiable por el método del espectrofotómetro de Flama (desarrollado por U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) se calculó con el valor de RAS,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{Na}^+$  solubles.

### **5.5 Análisis de los datos**

Los resultados obtenidos en el laboratorio y en el campo, se ordenaron en una base de datos donde se obtuvieron los promedios, la desviación y el error estándar. Posteriormente, se aplicó un análisis de ANOVA de un factor, con el propósito de conocer si existían diferencias significativas entre el contenido de agua aprovechable y de salinidad, en las distintos usos y profundidades del suelo. Por otra parte, para obtener la comparación de medias, se utilizó la prueba de comparación de medias de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Finalmente, se usó un análisis de correlación de Pearson, para saber, qué propiedades estuvieron mayormente vinculadas con el funcionamiento hídrico y el contenido de sales del suelo.

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Retención de humedad

#### 6.1.1 Agua aprovechable del suelo, en las distintas coberturas o usos del terreno.

La cantidad total de agua aprovechable para las plantas en el suelo presentó diferencias significativas ( $F=7.107$ ;  $GL=3$ ;  $P=0.001^*$ ) entre los distintos sitios estudiados. Encontrándose que el suelo de la parcela agrícola (A), fue el que más agua aprovechable almaceno, seguido por el matorral cerrado, mientras que el mezquital abierto (MA) es el que menos HA tiene (Cuadro 1 y Figura 5).

Cuadro 1. Valores promedio de propiedades relacionadas con la distribución del agua en el suelo.

Sitio/Prof cm	Arena	Limo	Arcilla	D.A.	Poros	M.O	C.C	PMP	t	H.A	Inf.
MC	%	%	%	kg/m <sup>3</sup>	%	%	%	%	%	l/m <sup>2</sup>	cm/hr
0 - 20	43.33	29.33	27.33	1.20	53.54	1.15	28.96	15.74	0.55	42.02	7.01
20 -40	52.00	23.33	22.00	1.29	43.01	1.20	25.54	13.88	0.61	30.01	NA
40 - 60	62.00	14.67	23.00	1.29	43.32	1.20	24.00	13.04	0.56	28.15	NA
60 -80	49.33	26.67	24.00	1.20	42.89	1.22	26.83	14.58	0.63	29.48	NA
										<b>Promedio</b>	<b>32.42</b>
<b>MH</b>											
0 - 20	42.00	32.00	26.00	1.52	26.11	0.90	27.97	15.20	1.61	38.73	1.95
20 -40	46.00	35.33	18.67	1.42	42.18	1.12	25.24	13.72	0.60	32.70	NA
40 - 60	48.00	38.67	13.67	1.13	46.32	1.30	23.60	12.82	0.52	24.31	NA
60 -80	47.33	34.67	18.00	1.11	51.62	1.14	24.81	13.48	0.49	25.19	NA
										<b>Promedio</b>	<b>30.23</b>
<b>MA</b>											
0 - 20	38.00	35.67	26.33	1.59	35.97	0.44	27.49	14.94	0.77	30.10	2.51
20 -40	50.00	35.33	14.67	1.09	55.62	0.77	21.99	11.95	0.40	21.83	NA
40 - 60	47.33	38.00	14.67	1.11	55.05	0.75	22.44	12.20	0.42	22.69	NA
60 -80	43.33	33.33	23.33	1.29	43.15	0.67	26.08	14.17	0.40	27.71	NA
										<b>Promedio</b>	<b>25.58</b>
<b>A</b>											
0 - 20	36.00	29.33	34.67	1.16	65.41	2.42	36.77	19.99	0.56	38.86	12.88
20 -40	36.33	32.00	31.67	1.11	52.89	3.11	37.71	20.49	0.71	38.06	NA
40 - 60	35.33	37.33	27.33	1.16	64.29	2.47	34.41	18.70	0.54	36.57	NA
60 -80	50.00	28.00	22.00	1.10	59.26	2.17	28.81	15.66	0.49	29.00	NA
										<b>Promedio</b>	<b>35.62</b>

MC= Matorral Cerrado, MA= Mezquital Abierto, MH= Matorral Halófito, A= Parcela con agricultura de riego, D.A= Densidad aparente, MO= Materia Orgánica, C.C= Capacidad de Campo, PMP= Punto de Marchitez Permanente, t=Relación Agua/Aire del Suelo, H.A.= Humedad Aprovechable Para las Plantas, Inf=Infiltración, NA= No aplica.

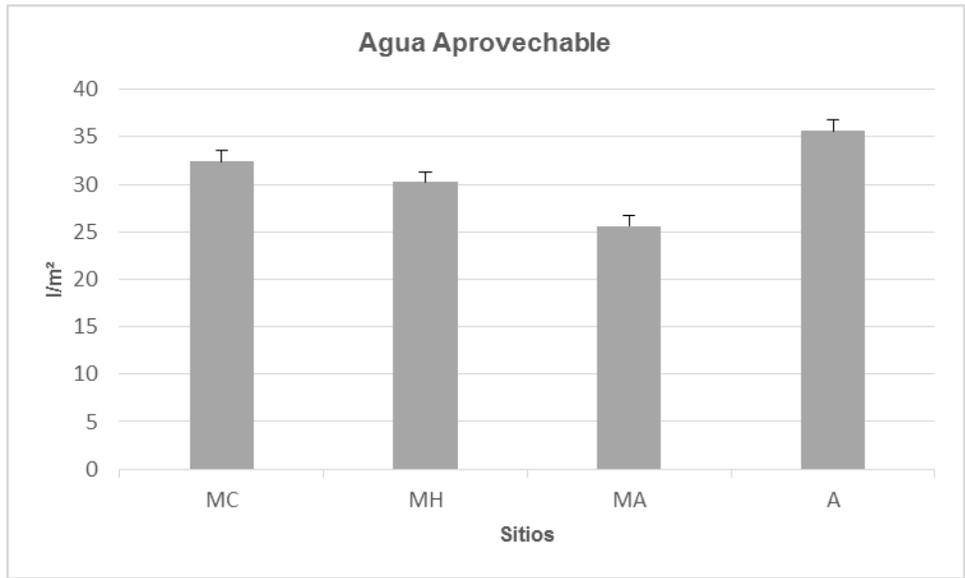


Figura 5. Distribución del agua aprovechable en los distintos sitios del área de estudio. (Valores promedio y error estándar)

Colomer y Sánchez, (2001) mencionan que los suelos protegidos por una cobertura vegetal densa mantienen más su reserva hídrica, dado que presentan un equilibrio natural entre las ganancias y pérdidas de residuos orgánicos, sin embargo cuando la cobertura vegetal es eliminada o reducida, el suelo recibe menos aportes de residuos orgánicos, incidiendo negativamente en los procesos de infiltración y por lo tanto en la capacidad del suelo para almacenar agua. De acuerdo a los datos obtenidos en este trabajo, MA es el sitio que menos porcentaje de materia orgánica presenta en comparación con A, lo cual puede deberse principalmente a que la vegetación del sitio se ha visto reducida a pequeños manchones, predominando el suelo desnudo. Esto ha incidido también en los valores de infiltración, ya que, mientras A tiene un valor de 12.58 cm/hr, MA tiene uno de 2.51 cm/hr (Cuadro 1). La disminución de la infiltración causa un aumento de la escorrentía y de los procesos erosivos del suelo.

Con respecto a otros parámetros que tienen que ver con la capacidad de almacenamiento de agua, se tiene que la capacidad de campo presento diferencias significativas ( $F=27.54$ ;  $GL=3$ ;  $P=0.000^*$ ) entre los distintos sitios estudiados, siendo también la parcela, el sitio que presento el valor más alto, los demás sitios presentaron un valor similar con menos diferencias entre ellos (Cuadro 1).

La capacidad de campo depende fuertemente de la proporción de las partículas que constituyen el suelo; la textura fina retiene más agua y su drenado es de forma más gradual que en texturas que contienen materiales más gruesos (Wesseling *et al.*, 2009), a medida que la textura es más fina el espacio poroso se incrementa y la densidad aparente disminuye (González *et al.*, 2011). En este caso, las fracciones limo-arcillosas predominan en los cuatro sitios, sin embargo la densidad aparente y la porosidad difiere entre ellos, lo cual incide en las diferencias de los valores de la C.C y el PMP (Figura 6). En A los valores de densidad aparente y porosidad corresponden a un criterio alto y medio correspondientemente, mientras que en el resto de los sitios, DA tiene un criterio alto y la porosidad medio (Cuadro 1; Criterios Tomados de Muñoz *et al.*, 2011).

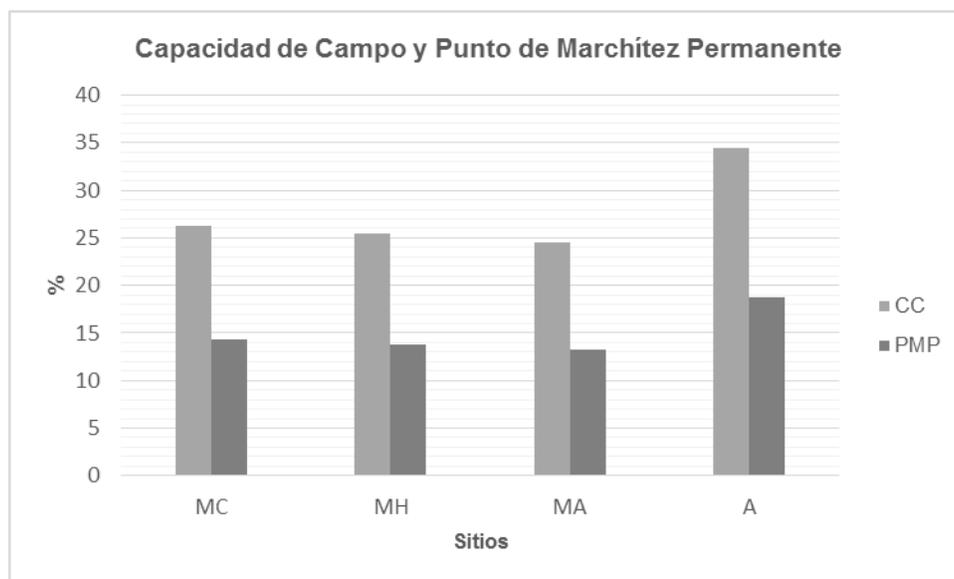


Figura 6 Diferencias entre la Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente.

Los suelos que presentan valores altos de densidad aparente, además de ver reducido su espacio poroso, aumentan la resistencia a la penetración y al crecimiento de las raíces de las plantas, limitando la absorción de agua y nutrientes (Reynolds *et al.*, 2002; Shepherd *et al.*, 2001). Daddow y Warrington, (1983) determinaron que valores de densidad aparente de  $1,46 \text{ kg m}^{-3}$  constituyen el umbral crítico para el desarrollo radicular de gramíneas, mientras que establecieron en  $1,65 \text{ kg m}^{-3}$  el umbral de crecimiento radical

### 6.1.2 Relación Agua/Aire

El óptimo desarrollo de la vegetación, requiere de adecuadas capacidades del suelo para el almacenar agua y aire. La capacidad de almacenamiento hídrico que tiene un determinado suelo depende en gran medida del volumen total de porosidad, a mayor proporción de porosidad capilar mayor será la retención de agua (Reynolds *et al.*, 2002). Con respecto a esto, los resultados indican que los cuatro sitios estudiados muestran diferencias significativas respecto a la porosidad ( $F=7.31$ ;  $GL=3$ ;  $P=0.000^*$ ). Como se puede observar en la Figura 7, la parcela tiene un mayor porcentaje de porosidad, respecto al resto de los sitios. La alta porosidad en A se puede asociar a al contenido de MO, a la textura y DA por el contrario, el espacio poroso más reducido del matorral halófito, se debe al bajo contenido orgánico y al estado de compactación del suelo (Cuadro 1). Resultados similares a los obtenidos fueron referidos por González *et al.*, 2011.

Si bien, la relación entre el almacenamiento del agua con la porosidad es evidente y fundamental, no es solamente la cantidad total de poros lo que define el comportamiento hídrico del suelo, sino también son las características específicas del sistema poral (forma, tamaño y distribución). Según, Gutiérrez *et al.*, (2011) la cantidad de agua en el suelo, es proporcional a la cantidad de microporos en él, sin embargo conforme los diámetros de los poros se reducen, la movilidad de las moléculas del agua se hace más baja, debido a los efectos de adsorción. De acuerdo a esto, podemos ver que si bien después de la parcela, MA es el sitio con más alta porosidad, no necesariamente el agua que puede acumular está disponible para la vegetación (Cuadro 1; Figura 5).

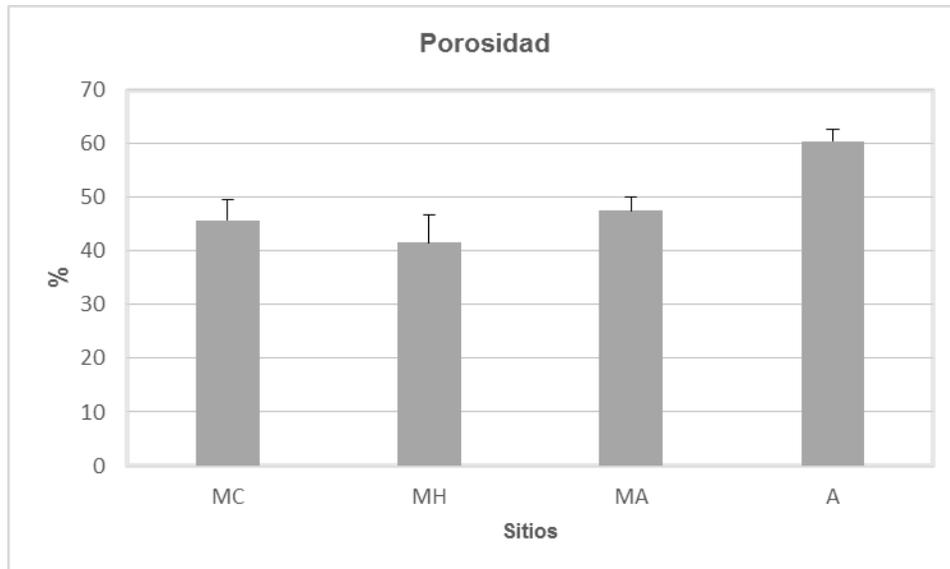


Figura 7. Porcentaje de porosidad del suelo en los sitios estudiados.

Por su parte, Olness *et al.*, (1998) propusieron que el balance óptimo entre la retención de agua y aire del suelo (independientemente del tipo de suelo), se alcanza cuando aproximadamente el 66% del espacio de los poros del suelo está lleno de agua, o de manera alternativa, cuando cerca del 34% del espacio de los poros está lleno de aire. Es por esto que cuando la relación agua/aire (t) obtiene un valor 0.66, se puede decir que el suelo tiene un óptimo balance en su capacidad para almacenar agua y aire (Reynolds *et al.*, 2002).

De acuerdo al estadístico, la relación agua/aire no mostró diferencias significativas respecto a los sitios ( $F=1.37$ ;  $GL=3$  y  $P=0.264$ ), no obstante, el matorral cerrado y la parcela agrícola fueron los sitios más cercanos al valor óptimo, mientras que el mezquital abierto fue el más lejano y el matorral halófito estuvo por arriba del valor ideal (Figura 8). Esto quiere decir, que en el mezquital abierto hay más cantidad de aire que de agua en el suelo y que en el matorral halófito existe un exceso de humedad, aunque no necesariamente se encuentra disponible para la vegetación (Cuadro 1; Figura 5), y que tanto en A como en MC existe cierto equilibrio. Un buen balance en el almacenamiento de agua y aire en el suelo, favorece a una mejor calidad física del suelo, ya que permite que propiedades como, la textura,

estabilidad de los agregados, densidad aparente, materia orgánica y porosidad se vean beneficiadas (Reynolds *et al.*, 2002).

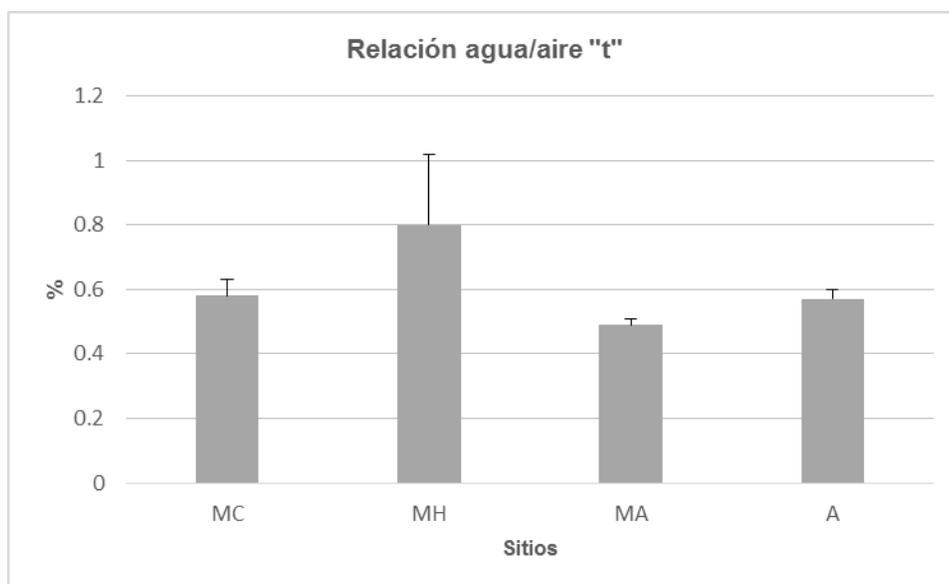


Figura 8. Relación agua/aire del suelo.

De manera general, el cambio de uso de suelo, el uso agrícola intenso y las malas prácticas de manejo agrícola y forestal tienden a reducir la calidad física del suelo (Reynolds *et al.*, 2002), repercutiendo en la capacidad de almacenamiento del agua y la capacidad productiva de la tierra (Lado *et al.*, 2004), debido principalmente a que se modifica la interacción entre las fracciones mineral y orgánica del suelo (Carter, 2004a; 2004b).

Sin embargo, la presente investigación, contradice lo anterior, ya que, la parcela agrícola es el sitio que tiene la mejor capacidad para almacenar y proveer agua aprovechable para las plantas. Lo cual se debe muy seguramente al contenido de materia orgánica, el cual favorece el proceso de infiltración, así como el volumen de poros del suelo, el cual a su vez, está fuertemente vinculado con la proporción de partículas de suelo y la densidad aparente (Cuadro 1).

De manera más concreta, las buenas condiciones de la parcela, reflejan el adecuado manejo del suelo; donde las labores de preparación (barbacheo), labores de cultivo (escarda, origera, deshierbe, fertilización), en cierta medida el

uso de agua de riego (debido a los aportes de nutrientes que puede contener) y el uso moderado de pesticidas, entre otros, favorece la presencia de propiedades edafológicas que promueven la buena capacidad hídrica del suelo.

Por otra parte, se realizó un análisis de correlación de Pearson para conocer qué propiedades del suelo son las más determinantes en el almacenamiento del agua (Cuadro 2). Los valores del índice, indican que las propiedades mayormente vinculadas con el contenido de agua aprovechable del suelo fueron: MO (0.89\*), arcilla (0.89\*) y DA (-0.59\*) (Figura 9).

Cuadro 2. Correlación entre el agua aprovechable y algunas propiedades físicas del suelo en los diferentes puntos de muestreo.

Propiedades	Coefficiente de Correlación	R <sup>2</sup>
Arcilla	0.89*	0.79
Arenas	-0.26	0.07
Limos	-0.49	0.24
Densidad Aparente	-0.59*	0.35
Porosidad	0.35	0.12
Materia orgánica	0.89*	0.79

R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinación.

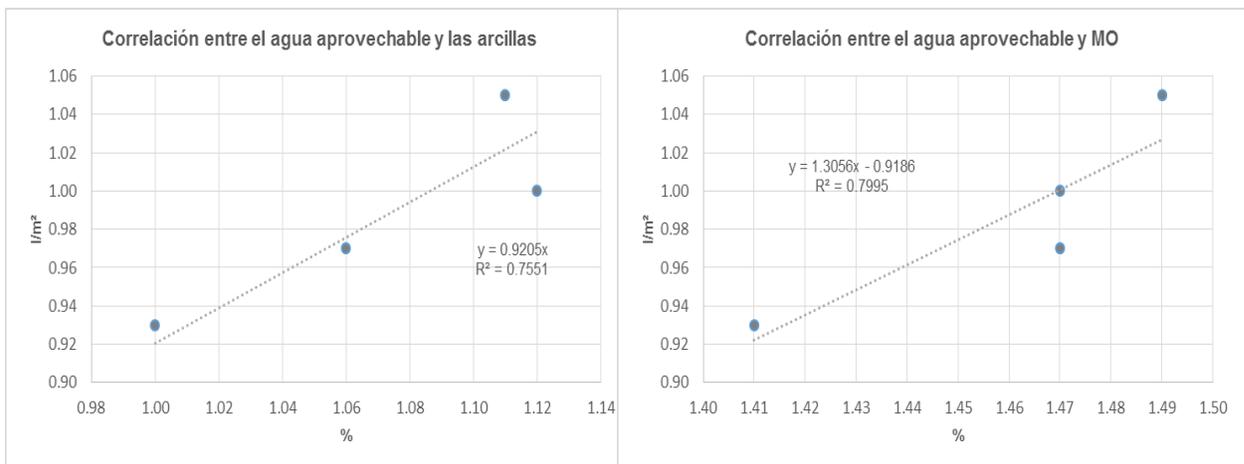


Figura 9. Diagramas de dispersión de las propiedades que mostraron una mayor correlación con la capacidad de retención de agua aprovechable del suelo.

De acuerdo a estos resultados, las arcillas guardan una relación positiva con el flujo del agua, y a su vez, constituyen un mecanismo por el cual, el suelo es capaz de retener mayor cantidad de humedad (Boix *et al.*, 1996; Yariv & Michaelian, 2002). Debido a su alta área superficial y características de adsorción, los suelos de tendencia arcillosa tienen una mayor capacidad de retener agua en forma disponible para las plantas, en comparación a las que pudieran tener un suelo con partículas más grandes. Es por esto que cuando el porcentaje de arcilla aumenta, los valores del agua aprovechable aumentarán (Cuadro 2; Figura 9).

Este resultado también está vinculado con los valores de porosidad y de densidad aparente, ya que dependiendo de cuales sean las partículas que predominen en el suelo, habrá un mayor o menor porcentaje de poros. A su vez, la porosidad se relaciona con los valores de densidad aparente, puesto que al aumentar ésta propiedad, el volumen total de poros disminuirá, relacionándose generalmente con suelos compactados. Los suelos compactados, presentan generalmente una baja reserva hídrica, debido a la falta de un mayor espacio poroso que permita la movilidad del agua (González *et al.*, 2009).

Algo parecido a lo anterior, ocurre cuando el porcentaje de materia orgánica aumenta (Figura 7). Como ya se ha mencionado antes, las reservas orgánicas del suelo permiten incrementar las reservas de agua en el perfil edáfico (Dexter *et al.*, 2008; Shepherd *et al.*, 2001).

Salcedo *et al.*, (2007) encontraron resultados similares a este. Ellos sostuvieron que cualquier aumento en el contenido de la materia orgánica en la superficie del suelo, significa una elevación en el porcentaje de agua aprovechable, por el contrario una escasez de residuos orgánicos, aumenta el riesgo de que la vegetación presente estrés hídrico. A su vez Yariv & Michaelian, (2002) indican que cuando hay una mayor interacción entre los materiales orgánicos y la matriz arcillosa del suelo se promueve una mejor estructura física edáfica, con más proporción de mesoporos y se incrementa la capacidad de retención del agua.

### 6.1.3 Infiltración

Antes de continuar, cabe aclarar que esta propiedad sólo se puede evaluar en el horizonte superficial que es donde el agua entra al suelo, aunque también se admite que el agua puede llegar por ascenso capilar desde los mantos freáticos.

Como se observa en la gráfica de la Figura 10, el suelo de la parcela agrícola seguido del matorral cerrado son los que presentaron las tasas más altas de infiltración mostrando diferencias significativas ( $F=14.91$ ;  $GL=3$ ;  $P=0.001^*$ ) con los sitios MA y MH siendo este último, en donde menos agua pasa al interior del suelo

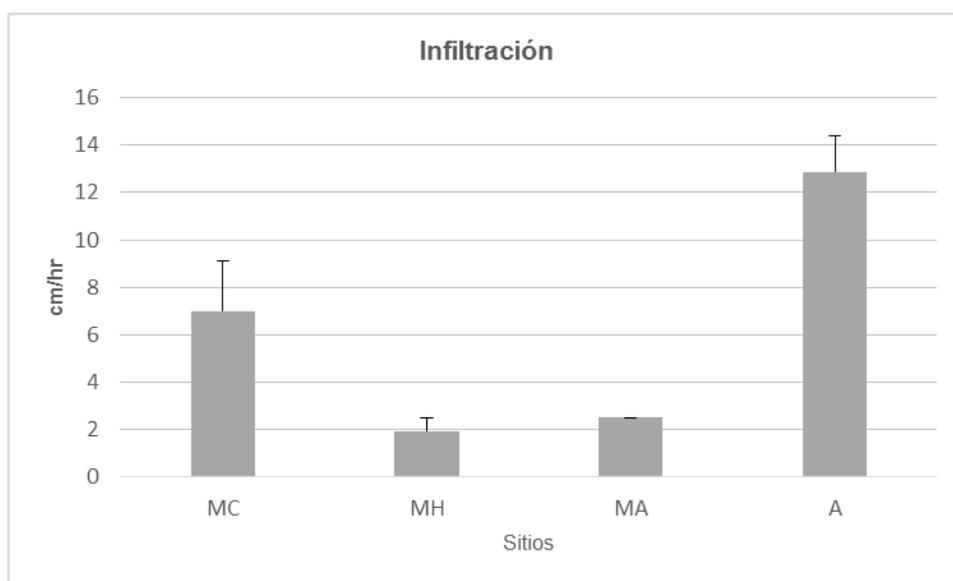


Figura 10. Velocidad de Infiltración en el suelo de los cuatro sitios evaluados

De acuerdo a esto, podemos inferir que la alta tasa de infiltración de la parcela agrícola es gracias al contenido de materia orgánica. Al respecto, Wezel *et al.*, (2002) concluyeron que conforme el suelo presenta mayor cantidad de hojarasca y residuos orgánicos en su superficie, la cantidad de agua que puede entrar en un suelo es mayor que en uno desnudo.

En contraste con lo anterior, la eliminación de la cubierta vegetal en el matorral halófito, interrumpió el aporte continuo de residuos orgánicos, dándose una

reducción del espacio poroso y un incremento en la densidad aparente (Cuadro 1), lo cual repercutió en una menor entrada y movimiento del agua al interior del suelo. La porosidad del suelo en los primeros centímetros de profundidad determina en gran medida la infiltración, el escurrimiento (González *et al.*, 2011) y la difusión de los fluidos a través del suelo (Reynolds *et al.*, 2002).

Por su parte el análisis de Pearson corrobora lo dicho anteriormente, ya que tanto la porosidad (0.72\*), MO (0.89\*), DA (-0.92\*) y el porcentaje de arcilla (1.00\*) son las propiedades que están determinando en gran medida la tasa de infiltración. De acuerdo a estos resultados se tiene que la infiltración puede aumentar cuándo la densidad aparente disminuya y cuando el porcentaje de materia orgánica, arcilla y de porosidad se incremente (Figura 11).

Así mismo, Neris *et al.*, (2012) mencionan que la infiltración es una propiedad que no solo depende factores como, la porosidad, textura, materia orgánica, sino que también depende de características como la salinidad, encostramiento, relieve, pendiente, los cuales pueden facilitar o limitar la velocidad de infiltración.

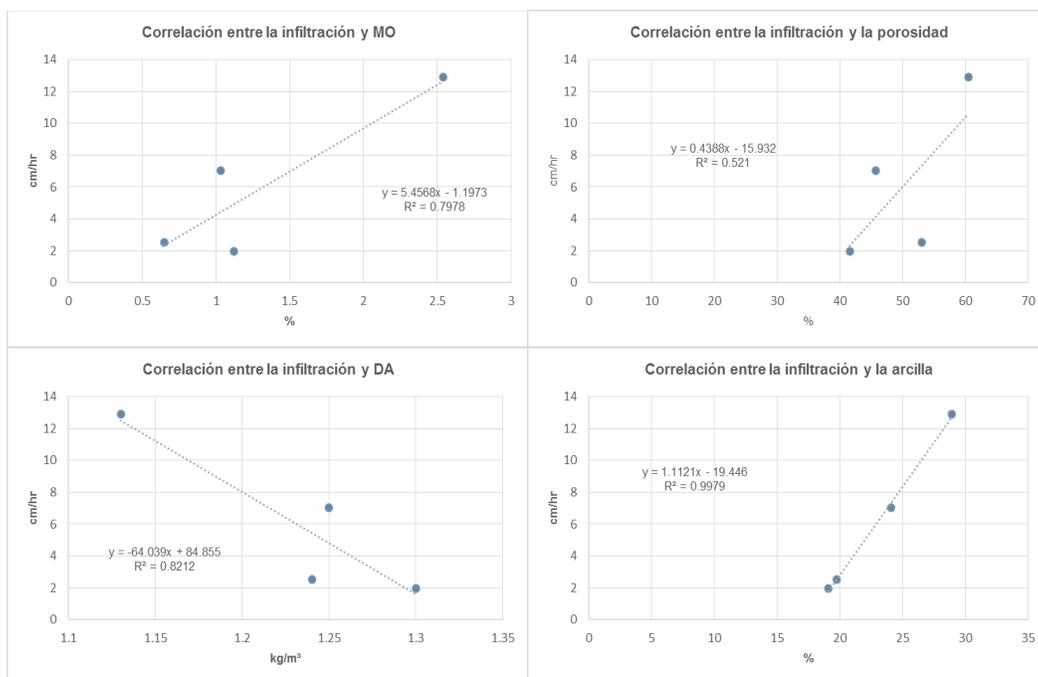


Figura 11. Correlación entre la tasa de infiltración, materia orgánica, porosidad, arcillas y densidad aparente.

#### 6.1.4 Distribución del agua aprovechable a diferentes profundidades del perfil edáfico en diferentes coberturas o usos del terreno.

Para reconocer en qué parte del perfil edáfico de los distintos sitios se concentra la principal reserva de agua disponible para las plantas y para analizar el comportamiento de las propiedades mayormente vinculadas con la retención de humedad, se realizó un análisis de varianza unifactorial. El resultado de esta prueba se presenta en el Cuadro 3

Cuadro 3. Retención de humedad en las diferentes profundidades del perfil edáfico en los distintos usos de la tierra.

Propiedades	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-80 cm	
	F	P	F	P	F	P	F	P
H.A	2.18	.000*	39.57	.000*	51.33	.167	1.00	.438
Arcillas	38.765	.000*	25.392	.000*	34.059	.000*	4.111	.049*
D.A	9.319	.005*	1.094	.405	5.021	.030*	1.683	.247
Porosidad	8.841	.006*	4.667	.036*	4.397	.042*	6.033	.019*
t	2.149	.172	18.462	.001*	2.095	.179	4.503	.039*
MO	12.314	.002*	21.672	.000*	24.609	.000*	9.314	.005*

\*Diferencias significativas  $\alpha < 0.05$

En cuanto a la distribución vertical del agua aprovechable en los distintos perfiles del suelo, las profundidades de 0-20 y de 20-40 mostraron diferencias significativas, respecto a las dos últimas profundidades evaluadas. De manera análoga la mayoría de las propiedades vinculadas con la capacidad hídrica del suelo (MO, contenido de arcillas, porosidad y D.A) tienden a concentrarse en las capas superficiales (0-40 cm) (Cuadro 3).

Al respecto Liebig *et al.*, (2004) indican que el contenido de HA está relacionado positivamente con la fracción fina del suelo y los complejos organominerales. Por el contrario, una menor cantidad de agua aprovechable se debe a una disminución en la capacidad de retención de la misma, ya sea por la falta de partículas minerales activas (Yariv & Michaelian, 2002), disminución de la materia orgánica causada por los procesos de mineralización y uso posterior de los cultivos, o por erosión del suelo (Lado *et al.*, 2004).

Como ya se mencionó antes, el contenido de materia orgánica es la variable que contribuye ampliamente en la capacidad del suelo para almacenar agua en los suelos de MC y A, ya que gracias al denso dosel, a la hojarasca y a los residuos orgánicos que se presentan en la superficie de estos sitios, se evita una evaporación excesiva y la infiltración se ve favorecida (Muñoz *et al.*, 2013).

En cambio, en los sitios donde la vegetación se va visto degradada a pequeños manchones, el contenido de humedad tiende a ser menor, lo que pone en evidencia que es en estos sitios, dónde hay una mayor escasez de reciclaje de residuos orgánicos (Gicheru *et al.*, 2004) debido al impacto negativo que el cambio de uso de suelo ha producido sobre el abatimiento de las reservas orgánicas del suelo.

Por último, es bien conocido que las distintas especies han desarrollado diferentes estrategias para abastecerse de agua, ya que no hay una profundidad específica donde se concentre más dicho líquido. Al respecto Breshears & Barnes, (1999) proponen un modelo conceptual, donde describen como las diferentes especies de plantas (herbáceas, arbustos y leñosas) obtienen el agua de las distintas capas del suelo, lo cual está determinado primeramente por el clima y uso del suelo, así como por las diferencias en la distribución de la humedad en el suelo con respecto a la profundidad (vertical) y de un lugar a otro (horizontal).

Ellos señalan que la cobertura de plantas arbustivas y leñosas se incrementara cuando la humedad en las capas más profundas del suelo aumente y a su vez la biomasa herbácea aumentará cuando el agua se concentre en las capas superficiales. De manera que la dominancia de plantas herbáceas corresponde a que la humedad del suelo se encuentra en los compartimientos superiores del perfil edáfico, y por el contrario, la superioridad de plantas arbustivas y leñosas corresponde con altos niveles de agua en las capas medias e inferiores del suelo correspondientemente, lo cual no es consistente a lo reportado en este estudio, ya que el agua aprovechable tiende a concentrarse en las capas superficiales de los

cuatro sitios evaluados, sin importar que la vegetación predominante sea vegetación arbórea, herbácea o si el suelo no presente vegetación.

Sin embargo, la mayor distribución hídrica en las capas superiores del perfil, parece no repercutir desfavorablemente a la vegetación natural del matorral cerrado, pues los mezquites son plantas que debido a su sistema radicular obtienen agua de capas más profundas, mientras que la vegetación herbácea se ve favorecida a estas particularidades.

## 6.2 Salinidad

### 6.2.1 Distribución de la salinidad y sodicidad del suelo bajo diferentes usos y coberturas.

El valor total de salinidad no presentó diferencias significativas ( $F=2.48$ ;  $GL=3$  y  $P=0.073$ ) entre los distintos sitios, sin embargo, el porcentaje de sodio intercambiable si presentó diferencias significativas ( $F=11.59$ ;  $GL=3$  y  $P=0.000^*$ ) (Cuadro 4; Figura 12). De acuerdo a los resultados, todos los sitios con excepción de la parcela agrícola presentan cierto grado de salinidad y sodicidad, siendo el suelo del matorral cerrado y el del matorral halófito los que mostraron la mayor problemática, mientras que MA muestran una salinidad moderada, esto de acuerdo a los criterios establecidos por la (USDA, 1999).

Cuadro 4. Valores promedio de las propiedades relacionadas con la salinidad y sodicidad a lo largo del perfil edáfico en los distintos sitios.

Sitios	Ca <sup>++*</sup>	Mg <sup>++*</sup>	Na <sup>+</sup>	Na <sup>**</sup>	PSI	MO	pH	C.E	Sal
	(meq/ 100g)	(meq/ 100g)	(meq/ 100g)	(meq/ 100 g)	%	%	H <sub>2</sub> O 1:2.5	dS/m <sup>-1</sup>	(meq/ 100g)
<b>MC</b>									
0-20	4.91	3.86	28.62	28.91	19.08	1.15	8.24	12.69	7.30
20-40	4.91	2.81	75.79	22.53	59.17	1.20	8.09	9.07	4.68
40-60	3.51	2.10	76.16	22.17	62.57	1.20	8.37	9.05	4.36
60-80	3.51	2.11	27.81	21.59	24.76	1.22	8.54	4.72	2.32
<b>MH</b>									
0-20	3.10	5.74	89.37	25.28	33.80	0.90	7.48	31.63	16.35

20-40	7.36	2.45	24.21	12.97	13.58	1.12	8.07	3.09	1.88
40-60	8.42	3.93	12.09	12.24	4.95	1.30	7.92	2.3	1.36
60-80	5.26	3.15	13.62	7.53	8.65	1.14	7.91	1.54	0.93
<b>MA</b>									
0-20	6.01	4.33	15.4	18.76	13.30	0.44	8.28	13.21	7.41
20-40	4.91	4.21	17.23	9.12	11.31	0.77	7.88	1.93	1.22
40-60	4.21	2.45	16.88	8.18	12.54	0.75	7.82	2.11	1.31
60-80	5.78	3.82	54.04	12.9	40.87	0.67	7.78	6.28	3.49
<b>A</b>									
0-20	5.61	5.61	13.48	10.57	7.23	2.42	7.92	2.65	1.91
20-40	3.86	10.17	18.27	9.34	9.31	3.11	7.98	2.29	1.36
40-60	5.96	4.21	19.22	9.20	11.37	2.47	8.00	2.48	1.48
60-80	5.26	5.26	29.66	7.60	16.61	2.17	7.94	1.90	1.01

C.E=Conductividad eléctrica; Sal= Salinidad; PSI= Porcentaje de sodio Intercambiable, MO= materia orgánica, \*= ion soluble y \*\* = ion intercambiable

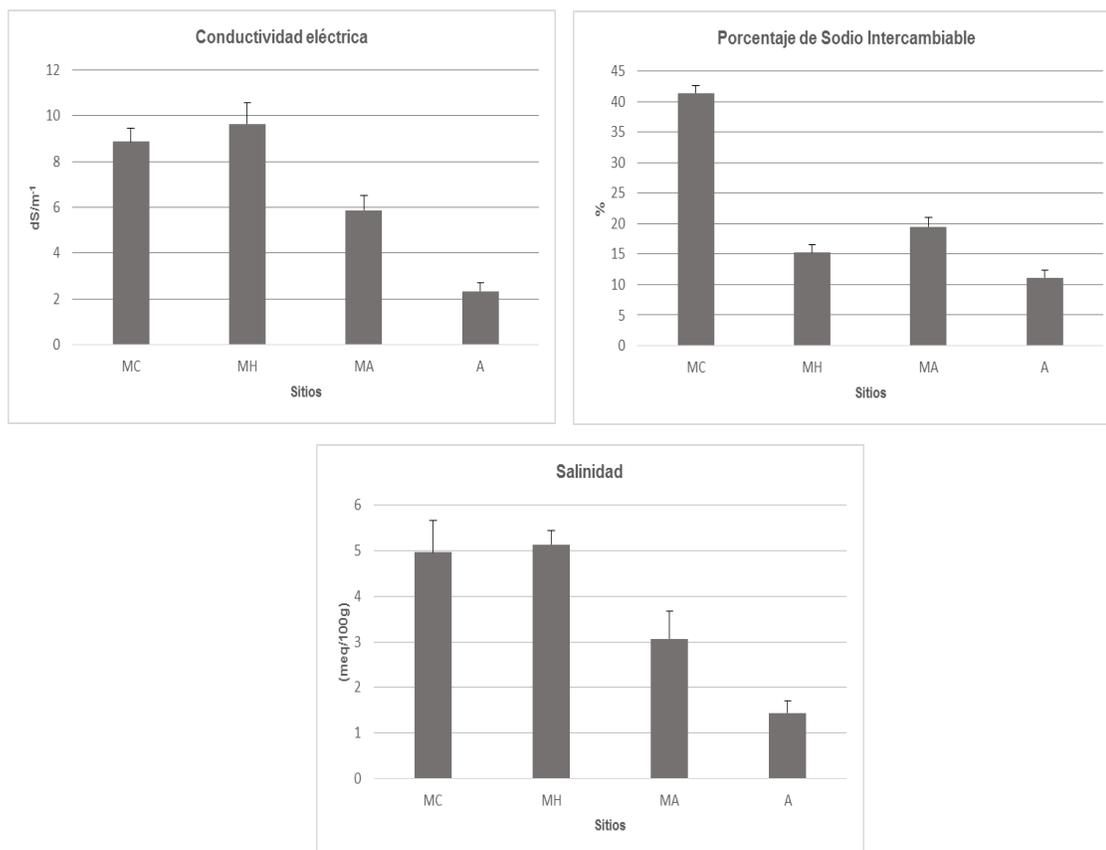


Figura 12. Distribución de la salinidad y sodicidad en los cuatro sitios de muestreo.

Los fenómenos de salinización y sodicidad son muy frecuentes en los suelos de regiones áridas y semiáridas, y pueden provocar efectos adversos en el crecimiento y productividad del ecosistema (Levy *et al.*, 2005; Wong *et al.*, 2010). La concentración de sales solubles en el suelo depende de varios factores como: influencia del material parental, drenaje deficiente, uso de agua de riego de mala calidad o implementación de sistemas de riego inadecuados, exceso en el uso de fertilizantes y cambio de uso de suelo (Zamora *et al.*, 2008; Arbelo *et al.*, 2006).

Como se puede observar en el Cuadro 4, tanto MC como MH que son los sitios con una mayor problemática de sales, son también los sitios en donde hay una mayor concentración de iones o sales solubles, principalmente de sodio. La acumulación de sales solubles en el perfil edáfico, limita la calidad física y química del suelo, de manera que puede haber un deterioro de la estructura, formación de costras en la superficie y por lo tanto baja capacidad de infiltración (Villavicencio *et al.*, 2011). En este caso, el sellado superficial de matorral halófito debido a la presencia de sales, provoca que la tasa de infiltración disminuya y por lo tanto que su capacidad hídrica y el desarrollo de la vegetación se vea limitada.

De acuerdo a esto último, la salinidad también afecta la absorción de nutrimentos como el  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $NO_3^-$ , lo cual se debe a la competencia entre los transportadores de iones, de manera que al aumentar el contenido de los iones solubles, en este caso el sodio ( $Na^{++}$ ), disminuye la absorción de elementos esenciales para las plantas (Rodríguez *et al.*, 2014; Villa *et al.*, 2006). Es por esto que, Quintana *et al.*, (2005) mencionan que además de la toxicidad iónica, el efecto de estrés hídrico, ocasionado por la disminución del potencial osmótico del medio de enraizamiento son los dos problemas fundamentales que la salinidad causa a las plantas.

En cuanto a la distribución vertical de la salinidad, se puede ver que ésta tiende a acumularse en mayor medida en las primeras capas de profundidad (0-40 cm) de los cuatro sitios, al igual que otras propiedades como: C.E, PSI y  $Na^{++}$  (Cuadro 4 y 5).

El problema de la salinidad, frecuentemente se da por el cambio de uso de suelo, especialmente cuando se destina al uso agrícola, ya que muchas veces las malas prácticas de manejo de la tierra repercuten desfavorablemente en la calidad de suelo. Referente a esto, Badr y Taalab, (2007) y Assouline, (2002) señalan, que el uso intensivo de agua de riego de mala calidad en terrenos agrícolas, aumenta la concentración de sales en la superficie, mientras que descargas menores están asociadas con una mayor eficiencia en la remoción de sales del suelo.

En relación a esto, podemos afirmar que si bien A, es el único sitio que usa agua de riego, las prácticas agrícolas que se llevan a cabo en este sitio, permiten tener las sales en niveles tolerantes o bien favorecen la remoción o el lavado de las sales que posiblemente se podrían acumularse en la superficie.

Por su parte, la concentración de sales en los primeros centímetros del perfil de MC, MH y MA, están relacionados directamente con las fluctuaciones del nivel freático, donde las sales acumuladas en el agua del subsuelo ascienden por capilaridad durante el proceso de evaporación (Martínez *et al.*, 2011; Salas, 2003; Zamora *et al.*, 2008), el cual se acentúa más cuando existe una sobre recarga de agua, especialmente por riego. No obstante, procesos como la escorrentía, variación de la pendiente o del micro-relieve, pueden causar que la acumulación de sales sea mayor en una zona que en otra (Torres y Acevedo, 2008)

Cuadro 5. Resultados del ANOVA para evaluar la distribución vertical de la salinidad y sodicidad del suelo en los sitios: MC, MH, MA y A.

Propiedad	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-80 cm	
	F	P	F	P	F	P	F	P
pH	2.45	.138	1.24	.356	14.88	.001*	48.22	.000*
Sal	55.97	.000*	18.96	.001*	14.36	.001*	13.49	.002*
C.E	83.83	.000*	32.34	.000*	31.50	.000*	16.51	.001*
Na**	14.87	.001*	9.93	.005*	13.55	.002*	47.41	.000*
PSI	50.96	.000*	103.64	.000*	331.79	.000*	109.67	.000*

\*Diferencias significativas  $\alpha < 0.05$ ; \*\*= ion intercambiable.

Por otra parte, las propiedades que mostraron una mayor relación con la salinidad se presentan en la Figura 13. Como se puede ver, la salinidad se encuentra estrechamente vinculada con la conductividad eléctrica, el contenido de arcilla y la materia orgánica, mostrando una correlación positiva con las tres variables, de manera que cuando aumentan los valores de C.E, arcilla y MO la salinidad tiende a aumentar o viceversa. Este comportamiento podría explicarse en el sentido de que al haber más coloides orgánicos y minerales, más iones son atrapados en estos complejos, aumentando así los niveles de salinidad (Cuadro 4).

Referente a la relación que hay entre la fracción arcillosa y la salinidad. Arbelo *et al.*, (2006) y Karlin *et al.*, (2012) reportan resultados similares a éste, ellos señalan que el contenido de arcilla muestra una correlación positiva con la salinidad y negativa con la proporción de arenas, alcalinidad y el contenido de carbonatos

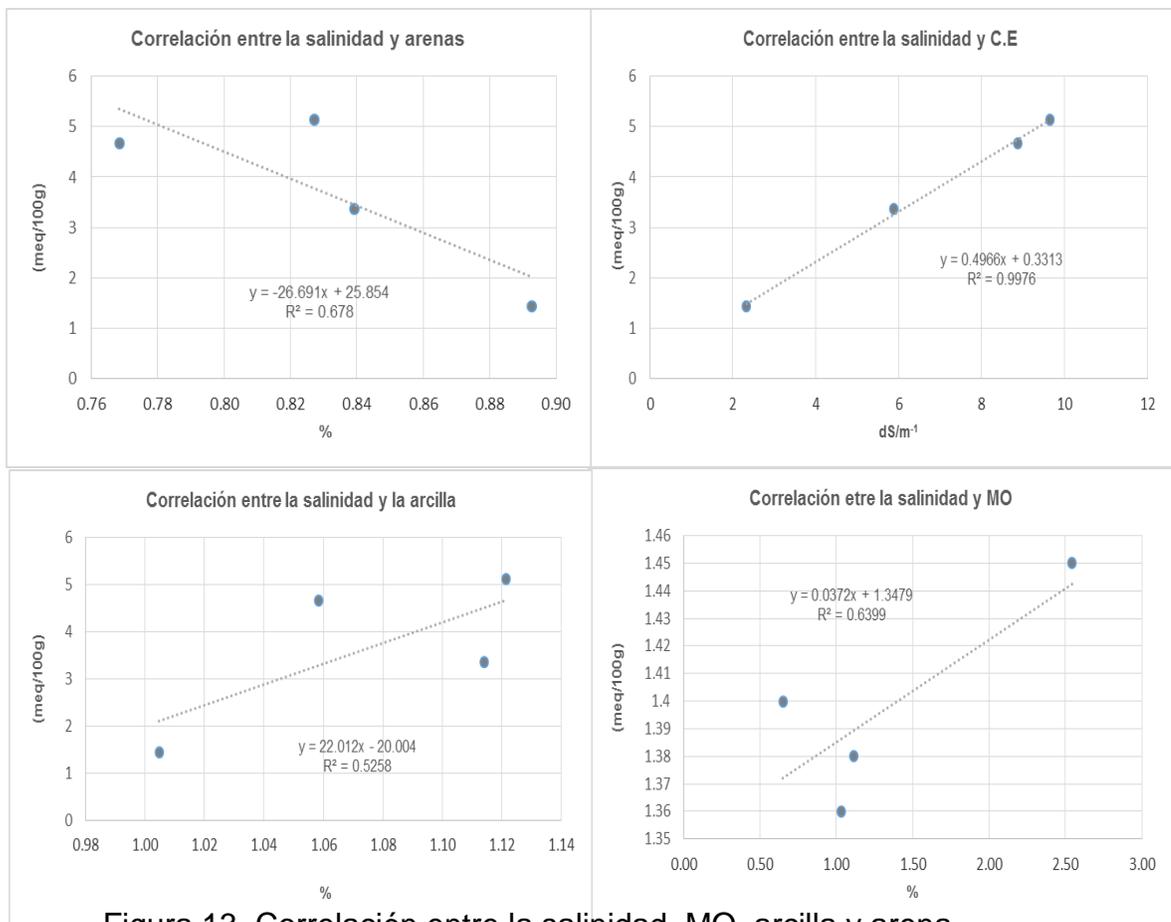


Figura 13. Correlación entre la salinidad, MO, arcilla y arena.

Para el caso de la sodicidad las propiedades que mayormente se correlacionaron con el PSI fueron, el pH,  $Ca^{++}$  y  $Mg^{++}$ , teniendo una relación positiva y negativa, correspondientemente (Cuadro 6; Figura 14).

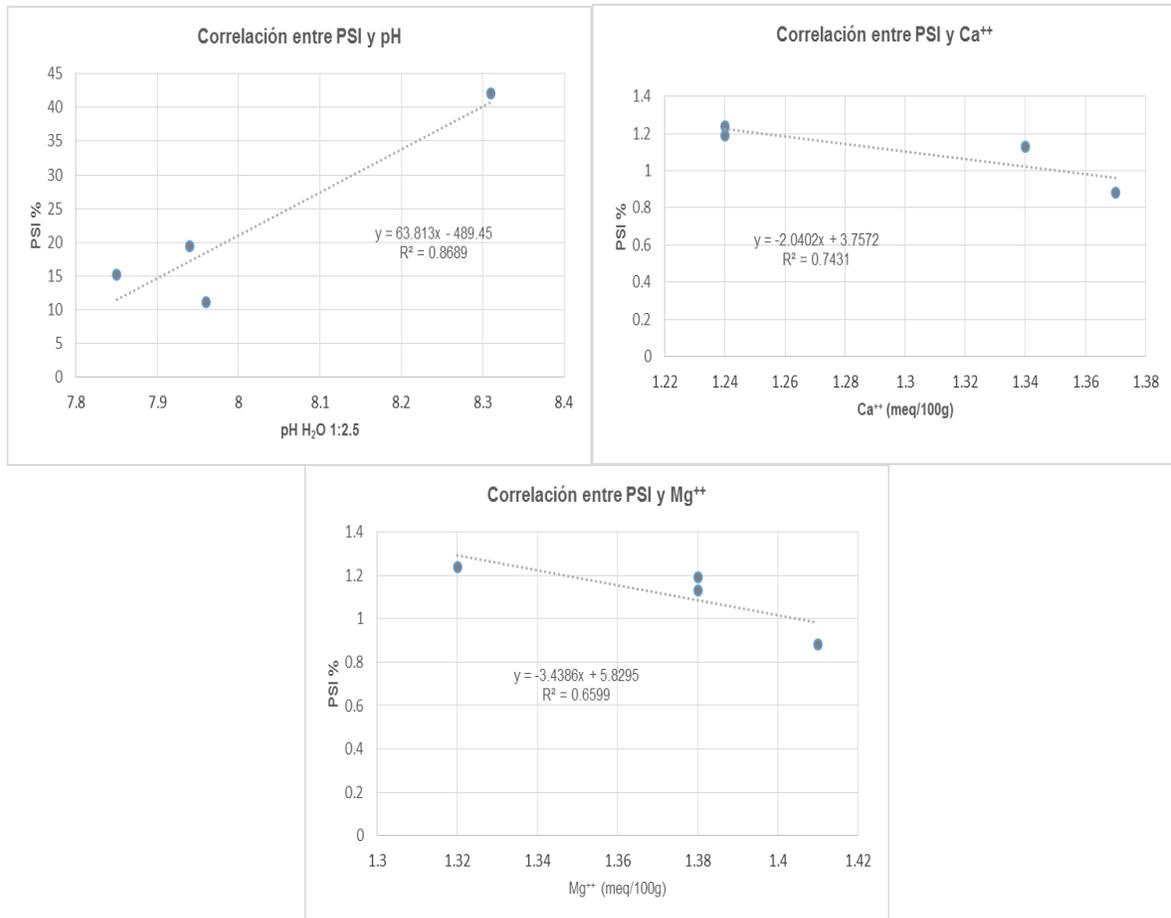


Figura 14. Correlación entre PSI,  $Ca^{++}$  y  $Mg^{++}$

La relación que hay entre la sodicidad y el pH, se relaciona estrechamente con el grado de salinidad del suelo, ya que cuando la salinidad es alta, la fuerza iónica de la solución edáfica mantiene el sodio adsorbido en el complejo de cambio, mientras que cuando aquella es baja, es posible la hidrólisis del sodio cambiante y como consecuencia se incrementa el pH de la solución. Bajo estas condiciones el  $CO_2$  se incorpora a la solución edáfica en forma de bicarbonatos que reaccionan con el calcio disuelto y precipitan en forma de carbonato cálcico, no hay que olvidar que es ésta sal la responsable de la sodicidad en el suelo (Arbelo *et al.*, 2006).

Así mismo, Arbelo *et al.*, (2006) mencionan que la alcalinidad o sodicidad se correlaciona positivamente con el pH, el sodio cambiante, la concentración de bicarbonatos y el contenido de carbonato cálcico.

El efecto más universal del cambio de pH en el suelo es sobre el crecimiento de las plantas, ya que el pH influye en la tasa de liberación de nutrientes, en la solubilidad de todos los materiales edáficos, en la cantidad de iones nutritivos almacenados en los sitios de intercambio catiónico y en la actividad microbiana (Thompson y Troeh, 1988; Tedeschi *et al.*, 2006).

Cuadro 6. Correlación de Pearson entre la sodicidad, pH, Mg, Ca, C.E., y MO.

Propiedades	Coefficiente de correlación	R <sup>2</sup>
pH	0.93*	0.87
Mg <sup>++</sup>	-0.98	0.97
Ca <sup>++</sup>	-0.80	0.64
C.E.	0.53	0.28
MO	-0.47	0.22

R<sup>2</sup>= Coeficiente de determinación.

En relación a los efectos que la salinidad puede ocasionar a las diferentes especies, Parés *et al.*, (2008) menciona que el exceso de sales puede afectar la germinación de las semillas, el crecimiento y entrada de agua a las plantas. Sin embargo, las plantas han creado mecanismos de tolerancia que les permiten continuar con sus funciones vitales en este tipo de ambiente, entre éstos se pueden considerar la dilución o la eliminación de sales a través de glándulas o tricomas secretores y la absorción selectiva de iones por las raíces favoreciendo al potasio sobre el sodio, entre otros (González *et al.*, 2002).

En particular, el género *Prosopis* se ha destacado por crecer en suelos de condiciones adversas, tales como suelos arenosos, arcillosos, ácidos, básicos o neutros, incluyendo dunas y por su capacidad de tolerar condiciones de salinización y sodización elevadas, sin embargo, aun cuándo se ha demostrado la

tolerancia de *Prosopis* a condiciones de ensalitramiento, se ha reconocido también que la germinación se reduce conforme aumenta la salinidad. Su elevada sensibilidad durante la germinación resulta ser el factor más determinante en la distribución de esta planta en un hábitat salino (Salas, 2003; Ríos *et al.*, 2010).

Haciendo un resumen de todo lo anterior y retomando el sistema de clasificación de suelos con exceso de sales propuesto por la USDA, (1999) se tiene que el suelo de MH y MC califican como salino-sódicos, MA como suelo salino y A como un suelo normal. Cabe resaltar que para MH solo la primera capa del perfil edáfico califica como salino sódico, mientras que el subsuelo carece de salinidad. Algo similar ocurre en MA, donde el horizonte superficial resultó ser salino y los demás no tienen exceso de sales.

Para explicar este comportamiento hay que entender que el proceso de salinización es muy dinámico y depende de diversos factores. Aunque de manera puntual, la presencia de sales en los suelos evaluados podría explicarse de dos formas; en primer lugar por el proceso de evaporación y en segundo lugar por elevación del manto freático, cabe resaltar que se piensa que particularmente para estos sitios, la salinidad se debe en mayor medida por elevación del nivel freático.

#### 6.2.2 Relación entre la distribución vertical del agua y el grado de salinidad dentro de los distintos usos de la tierra.

De acuerdo a los análisis previamente efectuados, se puede ver que tanto el contenido de agua aprovechable y la salinidad, están mayormente distribuidas en los primeros horizontes del perfil. Sin embargo, no se puede concluir que el volumen de agua aprovechable tiene alguna relación con el contenido de sales en los distintos perfiles del suelo.

No obstante, el cambio de uso de suelo y la eliminación de la cubierta vegetal, si poseen un efecto, aunque negativo, en las propiedades vinculadas con la capacidad hídrica del suelo, al igual que agravan los problemas sales en el suelo.

La eliminación de la cubierta vegetal, así como las malas prácticas de manejo de la tierra, favorecen la acumulación de sales solubles en el suelo. La acumulación de sales en los primeros horizontes del perfil, puede ocasionar la formación de costras, las cuales promueven el sellado superficial del suelo, disminución de la capacidad de infiltración del suelo y reducción en el desarrollo de la vegetación (Dexter *et al.*, 2008; Breshears & Barnes, 1999).

En el estudio realizado por Neris *et al.*, (2012) se encontró que el cambio de uso de suelo provoca una reducción en el contenido orgánico y en la estructura del suelo y que los valores de densidad aparente se incrementan, dando como resultado, la disminución de la capacidad de retención de agua en el suelo.

Por su parte, Tedeschi *et al.*, (2006) afirman que la dispersión de las partículas de arcilla y las propiedades hídricas del suelo son dependientes del grado de sodio en la solución y del uso de la tierra.

En la actualidad, la eliminación de la cubierta vegetal, así como el manejo poco apropiado de la tierra, tienden a impactar desfavorablemente las ofertas de agua en el suelo (Toledo, 2006; Zamora *et al.*, 2008). De acuerdo a esto y a los resultados obtenidos, se puede ver que la eliminación de la cubierta vegetal tanto en MH y MA, promueve la concentración de sales en el suelo y causa la disminución del contenido de agua en el perfil. En cambio, el adecuado manejo de la parcela agrícola, incide favorablemente en las propiedades edáficas del sitio, especialmente en el contenido de materia orgánica, el cual repercute positivamente en el espacio poroso del suelo, aumentando su capacidad de almacenamiento de agua (Neris *et al.*, 2012; Cuadro 1 y 4).

## 7 CONCLUSIONES

- La cantidad de agua aprovechable presentó diferencias significativas entre los distintos sitios, el suelo de la parcela agrícola (A) fue el que más agua aprovechable almacenó, mientras que el matorral abierto (MA) fue el que menos agua disponible retuvo.
- La relación agua/aire no mostró diferencias significativas respecto a los sitios evaluados. Sin embargo, se puede inferir que en MA hay más cantidad de aire que de agua en el suelo y que en MH existe un exceso de humedad, aunque no necesariamente se encuentra disponible para la vegetación, y que tanto en A como en MC existe cierto equilibrio.
- La capacidad de infiltración también mostro diferencias significativas. A y MC fueron los sitios que presentaron las tasas más altas, respecto a MA y MH, siendo este último, en donde menos agua pasa al interior del suelo
- Las propiedades mayormente vinculadas con el contenido de agua aprovechable así como con la capacidad de infiltración fueron: MO, % arcilla y DA. De manera que entre más densa es la cobertura del suelo, mayor será el contenido de materia orgánica, y por lo tanto, la cantidad de agua que retenga el suelo será más elevada.
- En cuanto a la distribución vertical del agua aprovechable en los distintos perfiles del suelo, las profundidades de 0-20 y de 20-40 mostraron diferencias significativas, respecto a las dos últimas profundidades evaluadas. De manera que el contenido de HA tiende a concentrarse más en las capas superficiales.
- El valor total de salinidad no presento diferencias significativas entre los distintos sitios, sin embargo, el porcentaje de sodio intercambiable si presentó diferencias importantes. Siendo MC y MH los que mostraron una mayor problemática, mientras que A no muestra problema alguno.

- En cuanto a la distribución vertical de la salinidad, se puede ver que ésta tiende a acumularse en mayor medida en las primeras capas de profundidad (0-40 cm), por el contrario el PSI tiende a ser mayor en las capas inferiores.
- Las propiedades que mostraron una alta relación con la salinidad fueron: C.E, % arcilla y MO. Para el caso de la sodicidad las propiedades que mayormente se correlacionaron con el PSI fueron, el pH,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ , teniendo una relación positiva y negativa, correspondientemente.
- Por último, se pudo concluir que el volumen de agua aprovechable no influye en el contenido de sales en los distintos perfiles del suelo. No obstante, la eliminación de la cubierta vegetal y el cambio de uso de suelo, si poseen un efecto significativo, aunque negativo, en las propiedades vinculadas con la capacidad hídrica del suelo, al igual que agravan los problemas sales en el suelo.

## 8 RECOMENDACIONES

- De manera general, se recomienda que para evitar el deterioro de las propiedades hidráulicas del suelo, se realicen prácticas tendientes a mejorar la porosidad, densidad aparente y textura del suelo, lo cual puede lograrse con prácticas mecánicas y manteniendo un nivel óptimo de materia orgánica, ya que se pudo observar que el contenido orgánico del suelo, determina en gran medida el volumen y disponibilidad del agua en cada uno de los sitios evaluados.
- Para evitar el futuro deterioro físico del área agrícola de la zona de estudio, se sugiere elaborar un adecuado plan de riego, que permita regular el uso de agua residual, ya que se ha encontrado que el prolongado uso del agua residual ha modificado el régimen hidrogeológico en especial la recarga y el flujo del agua subterránea, favoreciendo la formación de un acuífero somero, desde luego considerando la génesis y morfología de cada unidad de suelo, sin soslayar a los factores sociales, económicos y culturales de la región.
- Para los suelos con problemas de sales se pueden tomar varias alternativas, sin embargo lo primero que se debe de hacer para abordar este problema es determinar cuáles son los iones que ocasionan el ensalitramiento del suelo ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), para proceder a eliminar del suelo los excesos de ellas. No obstante, la implementación de buenos métodos de labranza (barbacheo profundo o subsoleo, aplicación de materia orgánica y la regulación de la calidad del agua de riego), causan que la concentración de sales en el suelo se menor.
- Implementar estrategias encaminadas a restaurar los paisajes afectados por la eliminación de la vegetación, con la introducción de especies nativas que incrementen el área de cobertura vegetal.

## 9 BIBLIOGRAFIA

- Acuña, E., Y Poch, M.R. (2001). Variabilidad de propiedades físicas de suelos forestales. Aplicación a la cuenca rasa de cogulers. *Edafología*, 8(3),11-24.
- Arenal, R. (1985). Estudio hidrogeoquímico de la porción centro-oriental del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Revista del Instituto de Geología*, 6(1), 86-97.
- Arbelo, C.D., Mora, J.L., Rodríguez, R.A., Guerra, J.A., Y Armas, C.M. (2006). Salinidad y alcalinidad en suelos de las zonas áridas de Tenerife (Islas Canarias). *Edafología*, 13(3), 171-179.
- Assouline, S. (2002). The effects of microdrip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. *Soil Science Society of America Journal*, 66(5), 1630-1636.
- Badr, M.A., & Taalab, A.S. (2007). Effect of drip irrigation and discharge rate on water and solute dynamics in sandy soil and tomato yield. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 1(4), 545-552.
- Boix, C., Calvo, A., Schoorl, J.M., Y Soriano, S.M.D. (1996). Influencia de la estructura y usos del suelo en las características de retención hídrica de suelos mediterráneos sobre litología caliza. En Grandal d'Anglade, A. y Pagés Valcarlos, J, (Eds.), IV Reunión de Geomorfología (pp. 587-596). Coruña: Castro.
- Breshears, D.D., & Barnes, F.J. (1999). Interrelationships between plant functional types and soil moisture heterogeneity for semiarid landscapes within the grassland/forest continuum: A unified conceptual model. *Landscape Ecology*, 14(5), 465-478.
- Carter, M.R. (2004a). Researching structural complexity in agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 1-6.

- Carter, M.R. (2004b). Soil quality as an indicator of sustainable tillage practices. *Soil and Tillage Research*, 78(4), 129-130.
- Cervantes, M.A., & Armienta, M.A. (2004). Influence of faulting on groundwater quality in Valle del Mezquital, México. *Geofísica Internacional*, 43(3), 477-493.
- Colomer, J.C.M., Y Sánchez, J.D. (2001). Agricultura y procesos de degradación del suelo. En: F.M. de Santa Olalla M. (ed.), *Agricultura y desertificación* (pp. 109-132). España: Mundi-Prensa.
- Cortes, M.C.O. (2011). Flujo, movimiento, transporte, entradas y transformaciones de nitratos en el agua subterránea en las inmediaciones de Tlahuelilpan, Valle del Mezquital, Hidalgo: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado de Ciencias de la Tierra, tesis profesional.
- Daddow, R., & Warrington, G. (1983). Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture (Reporte WSDG-TN-00005). Colorado: Watershed Systems Development Group.
- Delgado, D.M.D.R. (2000). Levantamiento edafológico semidetallado del territorio de la comunidad de Dexthí, Alto Mezquital, Hidalgo. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Tesis Profesional.
- Dexter, A.R., Richard, G., Arrouays, D., Czyz, E.A., Jolivet, C., & Duval, O. (2008). Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma*, 144(3-4), 620-627.
- Díaz, L.E. (1936). Estudio geológico del Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo. México: Secretaría de la Economía Nacional.
- Donald, S.L. (2003). *Environmental soil chemistry* (2da. ed.). USA: Elsevier Science.

- Duniway, C.M., Bestelmeyer, T.B., & Tugel, A. (2010). Soil processes and properties that distinguish ecological sites and states. *Rangelands*, 32(6), 9-15.

Escamilla, A., Quintal, F., Medina, F., Guzmán, A., Pérez, E., Y Calvo, L. M. (2005). Relaciones suelo-planta en ecosistemas Naturales de la península de Yucatán: Comunidades dominadas por palmas: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Tesis Profesional.

- Fassbender, W.H., Y Bornemisza. E. (1987). *Química de suelos: con énfasis en suelos de América Latina* (2da ed.). Costa Rica: IICA.
- Gicheru, P., Gachene, Ch., Mbuvi, J., & Mare, E. (2004). Effects of soil management practices and tillage systems on surface soil water conservation and crust formation on a sandy loam in semi-arid Kenya. *Soil Tillage Research*, 75(2), 173-184.
- González, L.M., González, M.C., Y Ramírez, R. (2002). Aspectos generales sobre la tolerancia a la salinidad en las pantas cultivadas. *Cultivos Tropicales*, 23(2), 27-37.
- González, C.O., Iglesias, C.C.E., Y Suárez, M.H. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2), 57-63.
- González, B.J.L., González, C.G., Sánchez, C.I., López, S.A. Y Valenzuela, N.L.M. (2011). Caracterización de la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo. *Terra Latinoamericana*, 29(4),369-377.
- Gutiérrez, C.M. del C., Hernández, E.J., Ortiz, S.C.A., Anicua, S.R., Y Hernández, L.M.E. (2011). Relación porosidad-Retención de humedad en mezclas de sustratos y su efecto sobre variables respuesta en plántulas de lechuga. *Revista Chapingo. Serie de Horticultura*, 17(3),183-196.

- Gliessman, S.R. (2002). *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Costa Rica: Turrialba.
- Granados, S.D., López, R.G.F., Hernández, H.J. 2004. Agricultura nshanñhuotomí del Valle del Mezquital, Hidalgo. *TERRA Latinoamericana*, 22(1), 117-126.
- INEGI. 1981. Carta Topográfica, Tasquillo, F14C69, escala 1:50000. México. Mapa.
- INEGI. 2009. Guía para la interpretación de cartografía uso de suelo y vegetación: escala 1:250000: (serie III). México.
- INEGI. 2004. Guía para la interpretación de cartografía edafología: 1:250000: (serie III). México.
- Jiménez, C.B.E, Siebe, G.C., Y Cifuentes, G.E (Eds.). (2004). El reúso internacional y no internacional del agua en el Valle de Tula. En Jiménez, B., Marín, L. (Ed.), *El agua en México vista desde la academia* (pp. 33-57). México: Academia Mexicana de Ciencias.
- Karlin, M.S., Buffa, E.V., Karlin, U.O., Contreras, A.M., Coirini, R.O., Y Ruiz, P.E.J. (2012). Relaciones entre propiedades de suelo, comunidades vegetales y receptividad ganadera en ambientes salinos (Salinas Grandes, Catamarca, Argentina). *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 8(1), 30-45.
- Lado, M., Paz, A., & Ben-Hur, M. (2004). Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation, and soil loss. *Soil Science Society of American Journal*, 68(3), 935-942.
- Levy, G., Goldstein, D., & Mamedov, A. (2005). Saturated hydraulic conductivity of semiarid soils: Combined effects of salinity, sodicity and rate of wetting. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 653-662.

- Leiton, S.J.S. (1985). *Riego y drenaje* (1ra. ed.). Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- Liebig, M.A., Tanaka, D.L., & Wienhold, B.J. (2004). Tillage and cropping effects on soil quality indicators in northern Great Plains. *Soil Tillage Research*, 78(2), 131-141.
- López, G.F. 2001. Evaluación de recursos y planificación ecológica del uso del suelo, en los municipios de Cardonal, Tasquillo, Norte de Ixmiquilpan, Edo de Hidalgo. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Tesis Profesional.
- Martínez, S.M.J., Pérez, S.C., Molina, R.J., Tudela, M.L., & García, L.M.L. (2011). Monitoring salinization processes in soils by using a chemical degradation indicator. *Journal of Geochemical Exploration*, 109(1-3), 1-7.
- Mesa, D. (2003). Obtención de plantas resistentes a la salinidad para los suelos salinos cubanos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 37(3), 217-226.
- Muñoz, J.D.I. Y López, F.G. 1986. Levantamiento edafológico de Santiago de Anaya Hgo. Trabajo de Biología de Campo, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UANM. México. Inédito.
- Muñoz, J.D.I. Y López, F.G. 1987. Levantamiento edafológico del Valle de Actopan. 20º Congreso de la Sociedad Mexicana del Suelo. Noviembre 11-14. Zacatecas, Zac. México. p.17.
- Muñoz, J.D.I. Y López, F.G. 1986. Levantamiento edafológico Ixmiquilpan Hgo. Trabajo de Biología de Campo, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UANM. México. Inédito.

- Muñoz, I.D., Mendoza C.A., López G.F., Hernández M.M., Soler A.A. (2011). *Edafología Manual de análisis de suelos* (1ra ed.). México: FES Iztacala. UNAM.
- Muñoz, I.D.J., Ferreira, R.M., Escalante, A.I.B., Y López, G.J. (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.
- Neris, J., Jiménez, C., Fuentes, J., Morillas, G., & Tejedor, M. (2012). Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain). *Catena*, 98, 52-62.
- Olness, A., Clapp, C.E., Liu, R., Palazzo, A.J. (1998). Biosolids and their effects on soil properties. En Wallace, A., Terry, R.E. (Eds.), *Handbook of Soil Conditioners* (pp. 141–1659). New York: Marcel Dekker.
- Palmer, R. G.; Troeh, F. R. 1979. *Introducción a la ciencia del suelo: Manual de Laboratorio*. Universidad de Colombia.
- Parés, J., Arizatela, M., Sanabria, M.E., Y García, G. (2008). Efecto de los niveles de salinidad sobre la densidad estomática, índice estomático y el grosor foliar en plantas *Carica papaya* L. *Acta Botánica Venezuelica*, 31(1), 27-34.
- Peters, C.P.D., Bestelmeyer, T.B., Herrick, E.J., Fredrickson, L.E.D., Monger, H.C., & Havstad, M.K. (2006). Disentangling complex landscapes: New insights into arid and semiarid system dynamics. *BioScience*, 56(6),491-501.
- Porta, J., López-Acevedo, M., y Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3ra ed.). Madrid: Mundi-Prensa.

- Prieto, B.C.J. (2004). *El agua: sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación* (2da ed.). Colombia: Ecoe.
- Quintana, C.G., Sanabria, M.E., Ojeda, M.G., Y Valera, R.E. (2012). Efecto de la salinidad sobre la anatomía foliar y radical de la piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.) 'Española Roja'. *Pittieria*, 36, 87-108.
- Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Drury, C.F., Tan, C.S., & Lu, X. (2002). Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110(1-2), 131-146.
- Richards, A.L. (1990). *Suelos Salinos y Sódicos. Diagnóstico y Rehabilitación* (ed.). México: Limusa.
- Ríos, G.R., Salas, G.C.E., Monroy, A.A., & Solano, E. (2010). Salinity effect on *Prosopis laevigata* seedlings. *Terra Latinoamericana*, 28(2), 99-107.
- Rodríguez, D.A., Posadas, A., Y Quiroz, R. (2014). Rendimiento y absorción de algunos nutrimentos en plantas de camote cultivadas con estrés hídrico y salino. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20(1), 19-28.
- Salas, G.C.E. 2003. Emergencia y desarrollo de plántulas de mezquite (*Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. Ex Willd.) M.C. Johnst) Bajo gradientes de mezclas salinas: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Tesis Profesional.
- Salcedo, P.E., Galvis, S.A., Hernández, M.T.M., Rodríguez, M.R., Zamora, N.F., Bugarin, M.R., Y Carrillo, G.R. (2007). La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. *Terra Latinoamericana*, 25(4), 419-425.

Segerstrom, K. (1962). *Geology of the South-central Hidalgo and northeastern México, Mexico* (Boletín No. 1104-C). C.C De Washington: United States Government Printing Office.

- Shachak, M., Sachs, M., & Moshe, I. (1998). Ecosystem management of desertified shrublands in Israel. *Ecosystems*, 1(5), 475-483.
- Shepherd, T.G., Saggarr, S., Newman, R.H., Ross, C.W., & Dando, J.L. (2001). Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fractions in New Zealand soils. *Australian Journal Soil Research*, 39(3), 465-489.
- Skopp, J., Jawson, M.D., & Doran, J.W. (1990). Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. *Soil Science Society of America Journal*, 54(6), 1619-1625.
- Stratton, L.C., Goldstein, G., & Meinzer, F.C. (2000). Temporal and spatial partitioning of water resources among eight woody species in a Hawaiian dry forest. *Oecologia*, 124(3), 309-317.
- Tedeschi, A., Angelino, G., & Ruggiero, C. (2006). Physical and Chemical Properties of Long-term Salinized soils. *Italian Journal of Agronomy*, 1(2), 263-269.
- Toledo, A. (2006). *Agua, Hombre y Paisaje* (1ra ed.). México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).
- Torres, A.H., Y Acevedo, E.H. (2008). El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile. *IDESIA*, 26(3), 31-44.
- Thompson, L.M. y Troeh, F.R. (1988). *El suelo y su Fertilidad*. (4ta ed.). Barcelona, España: Reverté.

- USDA. (1999). Infiltration, Bulk Density and Electrical Conductivity test kit guide. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Services, Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Institute. Washington, DC, USA.

- 
- Vázquez, M.N.C. (2012). Evaluación del estado actual de degradación de tierra en la microcuenca “La Muñeca” en el Alto Mezquital, Ixmiquilpan, Hidalgo: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, tesis profesional.
- Velarde, J.C. (2007). *Riego y Drenaje* (1ra ed.). Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- Villa, C.M., Catalán, V.E.A., Inzunza, I.M.A., Y Sánchez, C.I. (2006). La fertilización nitrogenada y la salinidad del suelo afectan la transpiración y absorción de nutrimentos en plantas de chile. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 391-399.
- Villavicencio, M.N., López, A.C.V., Basurto, S.M., Y Pérez, L.R. (2011). Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo. *Tecnociencia Chihuahua*, 5(3),156-161.
- Wezel, A., Rajot, J.L., & Herbrig, C. (2000). Influence of shrubs on soil characteristics and their function in sahelian agroecosystems in semi-arid Niger. *Journal Arid Environments*, 44(2), 383-398.
- Wesseling, G.J., Stoof, R.C., Ritsema, J.C., Oostindie, K., & Dekker, W.L. (2009). The effect of soil texture and organic amendment on the hydrological behaviour of coarse-textured soils. *Soil Use and Management*, 25(3),274-283.
- Wong, V.N.L., Greene, R.S.B., Dalal, R.C., & Murphy, B.W. (2010). Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: a review. *Soil Use and Management*, 26(1), 2-11.
- Yariv, S., & Michaelian, K.H. (2002). *Structure and surface acidity of clay minerals*. En Yariv, S., & Cross, H. (Ed.), *Organo-clay complexes and interactions* (pp. 1-38). New York: Marcel Dekker.

- Yimer, F., Messing, I., Ledin, S., & Abdelkadir, A. (2008). Effects of different land use types on infiltration capacity in a catchment in the highlands of Ethiopia. *Soil Use and Management*, 24(4), 344-349.
- Zamora, F.R., Torres, D., Rodríguez, N., Y Zamora, F.J. (2008). Dinámica de las sales en un suelo sembrado con melón (*Cucumis melo*) bajo riego por goteo en la península de Paraguaná estado Falcón. *Multiciencias*, 8, 27-32.
- Zornoza, R., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Arcenegui, V., & Mataix-Beneyto, J. (2009). Comparison of soil physical, chemical, and biochemical properties among native forest, maintained and abandoned almond orchards in mountainous areas of eastern Spain. *Arid Land Research and Management*, 23(4), 267-282.