



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

Relación suelo-planta de cuatro  
especies del género *Mammillaria*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

B I Ó L O G A

PRESENTA

CARMINA GÁMEZ BARAJAS

DIRECTOR DE TESIS M. en C. RAMIRO RÍOS GÓMEZ

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN EN SISTEMÁTICA VEGETAL Y SUELO.  
LABORATORIO DE RESTAURACIÓN DE SUELOS.

Proyecto PAPIME clave PE212415



CDMX

Marzo 2017.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



*El suelo hace posible la vida*

*La vida protege a su generoso suelo*

*Cuida a tú suelo como a tú vida*

*Porque tú destino es el suelo*

**GRACIAS...**



## *Dedicatoria*



*A mi princesa, a mi hija, mi mejor compañía, MI VIDA COMPLETA!*

*Porque fuiste un personita muy importante durante éste proceso al aguantar que tu mamá llegara tarde, que saliera continuamente de práctica de campo y te deja dormir sin mí...*

*Porque me alentabas continuamente para terminar éste escrito y llenabas mi área de trabajo de detalles llenos de amor, porque al llegar a casa cansada, con sólo verte y encontrar las sorpresas constantes de la cena lista y tus cartas de amor, llenabas a mí ser de una nueva fuerza.*

*Por velar mí sueño en el agotamiento pero sobre todo en las enfermedades y podría escribir mil detalles más sobre tú gran corazón*

**POR ESTO Y MÁS, CON TODO MI AMOR DEDICADA A TI MI AMADA ELIANA**



## Agradecimiento

En especial a mi madre... por ser una ayuda incondicional y haber creído en mí en todo momento, alentarme a continuar pese a todas las trabas que se presentan en esta vida. Por apoyarme durante toda la carrera con mi princesa y poder lograr mis objetivos. Gracias Isabel, por la eternidad. A mi padre... por ser un apoyo en momentos difíciles y estar al pendiente de mis buenos y malos pasos durante estos años, porque fuiste y sé que seguirás siendo un apoyo para mi mamá y ella logrará estar a mi lado con ayuda incondicional. Gracias Gilberto, por la eternidad ¡GRACIAS!

Al amor... no sólo agradezco por el apoyo que sé lo tuve, lo tengo y lo tendré, realmente te doy las gracias por encontrarme, por elegirme desde aquellos tiempos en que los desayunos eran mi energía física y emocional para cumplir con esta meta. Vicente de aquí a la muerte ¡GRACIAS!

A mi familia A TODOS!! Pero a TODOS!! (chiste local), pero en especial a mis abuelos, Marciano y Margarita, a mis tíos Lupe y Oscar por ser mis segundos padres.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y particularmente a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por la formación que me regaló, pero sobre todo por haberse convertido en mi segundo hogar y cobijarme bajo cualquier circunstancia.

Es terrible agradecer a la persona responsable de que exista éste escrito y tener tan pocas líneas para expresar mi sentir ... a mi querido director de tesis, M. en C. Ramiro Ríos Gómez, porque lo menos fue haberme formado de manera excelente, lo sobresaliente radica en ayudarme a conocer mi ser y mejorar cada día con todo y sus implicaciones.

A mi madre académica la Dra. Bertha Peña Mendoza por cada momento de ayuda ilimitada y estar detrás de mí para no dejarme caer en esos momentos duros de la vida. Por ser una de las personas en quien siempre pienso cuando algo bueno y malo ocurre, por formar parte de éste momento especial.

A mi sinodales M. en C. Armando Cervantes Sandoval, M. en C. Ramiro Río Gómez, Dra. Bertha Peña Mendoza, M. en C. Balbina Vázquez Benítez y M. en C. Juan Manuel Valderrábano Gómez por cada observación realizada para enriquecer éste escrito.

Amigos a quien agradecer enormemente las risas, los consejos, abrazos, momentos inolvidables a lo largo de éstos años, unos están otros ya se fueron, entre ellos Oscar, Adriana, Arlene, Korina, Andrea, Fany, Mariana, Anita, Mayra, pero sin discriminar debo reconocer a mi hermana más que amiga, a la persona que tiene, ella y su familia, las puertas abiertas de mi casa, con quien pasé toda la carrera con risas, regañíos, aventuras, muchas horas de estudio y que hasta el día de hoy sigue presente, Thelma mi gran amiga... te quiero.



# ÍNDICE

Resumen	
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	2
<b>II. ANTECEDENTES</b>	4
2.1 Suelo: influencia sobre la vegetación	4
2.2 Raíces: su papel como interfase suelo-planta	5
2.3 Relación suelo-planta	7
2.4 Características generales de las Cactáceas	9
2.5 Género <i>Mammillaria</i>	11
<b>III. JUSTIFICACIÓN</b>	16
<b>IV. HIPÓTESIS</b>	16
<b>V. OBJETIVOS</b>	17
5.1 Objetivo general	17
5.2 Objetivos particulares	17
<b>VI. MATERIAL Y MÉTODOS</b>	18
6.1 Selección de especies, área de estudio y caracterización de cada sitio	18
6.2 Trabajo de campo	21
6.2.1 Muestreo, descripción morfológica e identificación perfiles edáficos	21
6.2.2 Muestreo de suelo de la zona radical	21
6.2.3 Recolecta de planta	22
6.3 Trabajo de laboratorio	22
6.3.1 Pretratamiento de las muestras de suelo	22
6.3.2 Pretratamiento de la planta	23
6.3.3 Análisis físico, químico y nutrimental del suelo y tejido vegetal	23
6.4 Fase de gabinete	24
<b>VII. RESULTADOS</b>	26
7.1 Tipo de vegetación	26
7.2 Suelo	27
7.2.1 Descripción de perfiles de suelo	27
7.2.2 Clasificación de suelo	35
7.2.3 Caracterización física y química del suelo de la zona radical	37
7.2.4 Diferencias entre 0-10 y 10-20 cm de profundidad del suelo de <i>M. compressa</i>	39
7.2.5 Medias de las propiedades físicas y químicas de los suelos	40
7.2.6 Correlaciones de rangos de Spearman	44
7.2.7 Análisis de Clúster	48
7.2.8 Concentración de nutrimentos en suelo, Kruskal Wallis y correlaciones rangos de Spearman	49
7.3 Nutrimentos	53
7.3.1 Nutrimentos a través del sistema suelo-planta y Prueba de Kruskal Wallis	53
7.3.2 Análisis de Clúster	61
7.4 Sistema radical	62
7.4.1 <i>Mammillaria compressa</i>	62
7.4.2 <i>Mammillaria flavicentra</i>	68
7.4.3 <i>Mammillaria dixanthocentron</i>	70
7.4.4 <i>Mammillaria rekoii</i>	72
<b>VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	75
8.1 Tipo de vegetación, descripción de perfiles edáficos	75
8.2 Clasificación de suelo	80
8.3 Caracterización del suelo de la zona radical	81
8.4 Correlaciones	85
8.5 Análisis de Clúster	86
8.6 Concentración de nutrimentos en suelo, Kruskal Wallis y correlaciones rangos de Spearman	87
8.7 Nutrimentos a través del sistema suelo-planta y prueba de Kruskal Wallis	90
8.8 Morfología del sistema radical	97
<b>IX. CONCLUSIONES</b>	101
<b>X. REFERENCIAS</b>	104

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. <i>Mammillaria compressa</i> , Municipio de Tasquillo, La Loma, Hidalgo	12
2. <i>Mammillaria flavicentra</i> Carretera Tejupan- San Cristóbal Suchixtlahuaca	13
3. <i>Mammillaria dixanthoncentron</i> municipio San Juan de los Cues, Oaxaca	14
4. <i>Mammillaria reko</i> i, municipio de Ixtlán de Juárez, Oaxaca	15
5. Mapa de localización de los sitios donde se realizó la recolecta de suelo y planta de <i>Mammillaria compressa</i> en el estado de Hidalgo	19
6. Mapa de localización de los sitios donde se realizó la recolecta de suelo y planta de <i>Mammillaria compressa</i> en el estado de Querétaro	19
7. Mapa de localización de los sitios donde se realizó la recolecta de suelo y planta de <i>Mammillaria compressa</i> en el estado de San Luis Potosí	20
8. Mapa de localización de los sitios donde se realizó la recolecta de suelo y planta de <i>Mammillaria flavicentra</i> , <i>Mammillaria dixanthoncentron</i> y <i>Mammillaria reko</i> i.	20
9 a-d. Porcentaje de los tipos de suelo del total de localidades donde se establecen las cuatro especies del género <i>Mammillaria</i>	36
10. Medias de las propiedades físicas y químicas de los suelos donde se establece <i>Mammillaria compressa</i> y la diferencia con leptosoles	39
11. Diferencias entre profundidades en los porcentajes de materia orgánica de los suelos donde se establece <i>Mammillaria compressa</i>	40
12 a-j). Comparación de medias de las propiedades físicas y químicas del suelo donde se establecen las especies del género <i>Mammillaria</i>	41
13 a-f). Diagramas de caja de las propiedades físicas y químicas del suelo que muestran las diferencias significativas entre las especies del género <i>Mammillaria</i>	46
14. Prueba de Clúster emparentando los suelos por sus propiedades físicas y químicas	48
15 a-f). Comportamiento de los nutrientes Nt, Ca <sup>+2</sup> , Mg <sup>+2</sup> , K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> y Zn <sup>+2</sup> en suelo, a lo largo del sistema radical y tallo de las cuatro especies del género <i>Mammillaria</i>	56
16 a-i). Comportamiento de los nutrientes Ni <sup>+2</sup> , Fe <sup>+2</sup> , Cu <sup>+2</sup> , Mn <sup>+2</sup> , Cd <sup>+2</sup> , Al <sup>+3</sup> , Pb <sup>+2</sup> , Se <sup>-2</sup> y Cr <sup>+3</sup> en suelo a lo largo del sistema radical y tallo de las cuatro especies género <i>Mammillaria</i>	59
17. Análisis de Clúster que muestra la distancia entre especies respecto propiedades del suelo, contenido y concentración de nutrientes	61
18. Sistema radical de <i>Mammillaria compressa</i>	62
19. Origen del sistema radical de <i>Mammillaria compressa</i> (vista inversa); a: Ramificación de raíces seceundarias, terciarias y cuaternarias; b: Degeneración de la raíz primaria	63

20. Raíces de <i>Mammillaria compressa</i> organizadas de forma radial, ejemplar de dos años de edad aproximadamente; a) Cuello del tallo, sitio de inicio de ramificación del sistema radical.	64
21. Raíz secundaria de <i>Mammillaria compressa</i> (una de las 6) con diámetro superior en la parte basal y sin presentar ramificación en los primeros centímetros	65
22. Urdimbre en el extremo de cada raíz que conforman el sistema radical de <i>Mammillaria compressa</i>	65
23. Comparación en la forma de ramificación del sistema radical de un ramets versus genet de <i>Mammillaria compressa</i>	66
24. Modelos del sistema radical de <i>Mammillaria compressa</i>	67
25. Sistema radical fibroso de <i>Mammillaria flavicentra</i>	68
26. Origen del sistema radical fibroso de <i>Mammillaria flavicentra</i>	68
27. Ramificación de las raíces de segundo orden de <i>Mammillaria flavicentra</i>	69
28. Sistema radical fibroso de <i>Mammillaria dixanthoncentron</i>	70
28. Sistema radical fibroso de <i>Mammillaria dixanthoncentron</i>	71
30. Origen de la ramificación de <i>Mammillaria dixanthoncentron</i>	71
31. Sistema radical fibroso de <i>Mammillaria rekoï</i>	72
32. Ramificación del sistema radical de <i>Mammillaria rekoï</i> a más de 10 cm de profundidad	73
33. Ramificación del sistema radical de <i>Mammillaria rekoï</i> , se observan raíces secundarias, terciarias y cuaternarias	74

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Página</b>
1. Parámetros y métodos utilizados para la caracterización física y química del suelo y concentración de nutrimentos en las diferentes muestras.	24
2. Datos de localización y tipos de vegetación del total de sitios de las cuatro especies del género <i>Mammillaria</i> .	26
3. Tipos de suelo del total de localidades y origen geológico.	35
4. Caracterización física y química del suelo de la zona radical.	38
5. Prueba de Kruskal-Wallis. Muestra las diferencias significativas entre 0-10 y 10-20 cm de los suelos de <i>Mammillaria compressa</i> .	39
6. Correlaciones de las propiedades físicas y químicas del suelo de la zona radical	44
7. Grado de correlación presente entre variables (Fowler <i>et al.</i> 1998)	44
8. Concentración de nutrimentos en los suelos donde se establecen las especies del género <i>Mammillaria</i>	51
9. Prueba de Kruskal Wallis. Se muestran las diferencias entre especies de acuerdo al contenido y concentración de los nutrimentos	52
10. Diferencias significativas de la concentración entre los diferentes almacenes de las diferentes especies del género <i>Mamillaria</i>	60

## RESUMEN

Se estudió la relación suelo-planta de *Mammillaria compressa*, especie de amplia distribución y *Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria rekoii* con distribución restringida. Se tomaron muestras de suelo (profundidad 0-10 cm), raíz (cinco diámetros) y tallo en 16 sitios, cada uno de los puntos de muestreo fue caracterizado ecológicamente, se realizó la apertura de un perfil edáfico y se describió morfológicamente a la vez que se identificó *in situ*. El análisis de laboratorio para las muestras de suelo consistió en la caracterización física y química utilizando los métodos convencionales, además de la determinación de 15 nutrimentos en suelo, raíz y tallo. El análisis estadístico se practicó con el programa de computo IBM SPSS versión 22 y Statgraphics centurion XVI versión 16.1.11, se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para profundidades en suelo de 0-10 (P<sub>1</sub>) y 10-20 cm (P<sub>2</sub>), se correlacionaron las variables físicas y químicas del suelo, con las medias de nutrimentos de los diferentes almacenes se identificó el comportamiento a lo largo del sistema suelo-planta. Finalmente, se procedió a realizar un análisis de Clúster para identificar los suelos más cercanos con base en sus propiedades.

Los resultados indican que *Mammillaria compressa* se distribuye en ocho tipos de vegetación y diferentes ambientes edáficos, no obstante, prefiere Leptosol lítico, suelo donde únicamente se establecen *Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria rekoii*. Por otra parte *M. dixanthoncentron* crece en suelos yesíferos con alto contenido de Ca<sup>+2</sup>, Fe<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup> y Al<sup>+3</sup> mientras que *M. rekoii* demanda más al Nt, Na<sup>+</sup>, Zn<sup>+2</sup>, Cr<sup>+3</sup> y Cu<sup>+2</sup> y *M. flavicentra* exige del Zn<sup>+2</sup>, Mn<sup>+2</sup>, Cu<sup>+2</sup> y Se<sup>-2</sup>, la materia orgánica es un componente importante en el establecimiento de estas dos últimas especies. Se encontró que *M. flavicentra*, *M. dixanthoncentron* y *M. rekoii* presentan predilección para establecerse entre fisuras de rocas o suelos someros y muy pedregosos mientras que los individuos de *M. compressa* tienen mayor biomasa en suelos profundos. Finalmente, ningún sistema radical de los aquí estudiados presenta un patrón definido de almacenamiento de nutrimentos.

## I. INTRODUCCIÓN

Una compleja fisiografía, variabilidad edáfica, diversidad geológica y climática son factores que al interactuar, crean una mayor complejidad de condiciones que hacen posible que la región en donde prevalecen, reúna los requisitos para que las especies se irradien, dando como resultado una diversidad genética, específica y ecosistémica. Éstas condiciones normalmente favorecen a un conjunto de taxones que tienen un potencial de diversificación, uno de ellos es la familia Cactaceae y México, es el sitio que reúne este conjunto de factores por lo que es considerado dentro de los cinco primeros lugares megadiversos por su riqueza florística, es además, el país con el mayor nivel de endemidad en su flora.

Las cactáceas figuran dentro de las quince familias con mayor número de especies nativas del país (Villaseñor 2003), alcanza un número aproximado de 1900 en 126 géneros (Anderson 2001), de los cuales 60 con 670 especies están representados en México que representa un 77 % (Guzmán *et al.* 2003).

Las especies que conforman las cactáceas presentan hábitos y formas de crecimiento (esta última especialmente en la tribu Cacteeae) de adaptaciones altamente especializadas (Vázquez-Sánchez *et al.* 2012), lo cual les confiere una fisonomía muy particular, el medio árido y desértico se considera el responsable de estas adaptaciones. El género *Mammillaria* forma parte de esta familia es uno de los más diversos en cuanto a especies se refiere y representa el 10 % de ésta (Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada 1991), con cerca de 200 especies de las cuales 190 se encuentran en México considerado el principal centro de diversificación con un alto porcentaje de endemismo (Arias *et al.* 2012). Haworth (1812) señala que el nombre proviene del latín *mamilla*, referido a los tubérculos. Se considera como un taxón compuesto por algunas especies “raras” que presenta rangos de distribución restringidos y poblaciones poco numerosas (Peters y Martorell 2001), mientras que otras son muy numerosas, al mismo tiempo, es uno de los géneros más llamativos por tanto saqueadas por coleccionistas, en gran medida, por la belleza de sus flores, cobrando importancia ornamental, sin dejar de lado usos como, fuente de alimentos, medicamentos y forrajes.

Las propiedades del suelo son determinantes para el exitoso establecimiento de ciertas especies (Escamilla 1999) y las mamillarias por lo peculiar de su distribución despiertan un

interés singular al no contemplarlas como organismos autónomos y más bien, considerar que existe una relación íntima con el suelo que es un ambiente extremadamente heterogéneo. La distribución inter e intraespecífica de las especies responden a ésta heterogeneidad gracias a la diversidad génica, creando una interacción suelo-individuo que conduce a que este último tolere estas condiciones y, a largo plazo, después de infinidad de generaciones, se tenga como resultado la adaptación de una población, sin embargo, ni el ambiente edáfico ni el genotipo son estáticos, por el contrario son dinámicos, de manera que el proceso es interminable.

En virtud de ser el suelo el medio de soporte de la vegetación terrestre, es de particular importancia estudiar la relación con la planta a través del sistema radical, en las mamillarias se presenta con características específicas gracias a las particularidades de los climas en que crece. Rivas (1996) refiere que la falta periódica de humedad, filtración rápida de agua e intensa insolación, influyen directamente en la estructura del sistema radical, sin embargo, cabe mencionar que en general todas las propiedades físicas y químicas del suelo tienen un impacto en ésta arquitectura. La raíz por ser el órgano de interfase suelo-planta presenta relevancia al realizar la absorción de agua y nutrimentos necesarios e indispensables para el desarrollo vegetal en todas sus etapas.

El género *Mammillaria* ha sido estudiado filogenéticamente (Butterworth y Wallace 2004), en su ecología, propagación y conservación (Valverde y Zavala-Hurtado 2006; Martorell y Patiño 2006; Peters *et al.* 2008; García-Rubio y Malda-Barrera 2009; Larios-Ulloa *et al.* 2015), no obstante, no existen trabajos sobre la relación suelo-planta en el género, por tanto es necesario realizar investigación sobre las condiciones del suelo en relación con las diversas respuestas de las plantas.

El presente trabajo se centra en la relación suelo-planta de cuatro especies del género *Mammillaria*, considerando al suelo como un factor importante dadas sus funciones ecológicas. Es el sistema que promueve el crecimiento vegetal, recibe, almacena depura, libera agua, recicla carbohidratos y nutrimentos a través de la mineralización de la materia orgánica, transfiere energía en la cadena alimenticia detritívora y actúa como buffer ambiental en la formación, atenuación y degradación de compuestos genobióticos y naturales.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1 Suelo: influencia sobre la vegetación

El suelo es un cuerpo natural, tridimensional, situado sobre la superficie de la tierra, es un componente del ecosistema donde viven un gran número de organismos que realizan procesos químicos individuales; está compuesto de material mineral y orgánico, es resultado de la topografía, material parental, organismos, clima y edad (Bautista y Palacio 2005), además de ser un componente importante en la mayoría de los ciclos naturales.

Las funciones del suelo son: a) soporte físico para el crecimiento de las plantas, b) es un factor principal que controla el flujo del agua en el ciclo hidrológico, así como de las especies químicas dentro de los ciclos biogeoquímicos, c) actúa como sistema de reciclado natural donde los productos de desecho son transformados a compuestos disponibles para las generaciones siguientes, d) es el hábitat de gran variedad de organismos vivos y e) es el soporte de la infraestructura, necesario para el desarrollo de la vida humana (Mingorance 2010).

Anaya (2003) considera al suelo como un ecosistema particular donde la materia orgánica de origen diverso y las raíces de las plantas constituyen el sustrato básico del que dependen los organismos. Todos los constituyentes del suelo (minerales, restos vegetales y organismos) son importantes por sí mismos, pero el factor más relevante para la planta en su crecimiento es la relación que existe entre ellos (Dalzell *et al.* 1991). La materia orgánica y los microorganismos del suelo unen las partículas minerales del suelo entre sí y crean las condiciones en las cuales las plantas respiran, absorben agua, nutrientes y desarrollan su sistema radical.

El suelo puede ser uno de los múltiples indicadores de las causas de las diferencias en el tipo y distribución de la vegetación en un ecosistema dado, debido a sus características físicas y químicas como: pH, materia orgánica, salinidad, disponibilidad de nutrientes, textura, profundidad, compactación y origen mineral, determinando la distribución natural

de la vegetación (Escamilla 1999). La morfología de las plantas lleva en cierta forma impresos diversos caracteres que proporcionan información de las condiciones del medio en que viven y de su área de distribución (Godínez-Álvarez *et al.* 2003), es decir que se ve afectada por la heterogeneidad del ambiente y de los requerimientos fisiológicos de cada especie. Los valores extremos en la temperatura fijan límites latitudinales y altitudinales de distribución, a una escala más local, las propiedades del suelo juegan un papel fundamental. En un ejemplo los cactus muestran una distribución espacial agregada, lo cual es un reflejo de la distribución heterogénea de los recursos en los ambientes que habitan.

Por otro lado, Escamilla *et al.* (2005) afirman que la persistencia a largo plazo de una especie dentro de condiciones particulares de suelo, conlleva un rango de características que dependen más de la especie vegetal, como plasticidad morfológica y fisiológica, que del suelo, sin embargo, este último es influenciado por el sistema radical de las plantas (Oliveira y Afif 2006) lo que conlleva a una estrecha relación suelo-planta.

## **2.2 Raíces: su papel como interfase suelo-planta**

El sistema radical, es el órgano de las plantas cuya función principal es la captura de nutrientes y agua, además de servir de soporte. Su distribución a lo largo del perfil del suelo está en función de la concentración de nutrientes así como de las propiedades físicas y químicas de éste (Álvarez-Sánchez y Naranjo 2003) sin dejar de lado el código genético.

La capacidad de captación del sistema radical se refiere a la demanda del nutriente por parte de la planta. Las raíces pueden concebirse como membranas semipermeables que funcionan como barreras al paso libre del agua y nutrientes hacia el interior de las plantas (Bautista y Palacio 2005). Leitón (1985) hace alusión que si bien, las características de enraizamiento, desarrollo y longitud pueden estar dadas por los factores genéticos, se debe tener presente que el ambiente edáfico que rodea a la raíz, puede modificar considerablemente la forma y penetración del sistema radical, a través de la presencia de

capas permeables cerca de la superficie, un nivel freático fluctuante o muy superficial y salinidad, entre otras.

Las plantas están continuamente extendiendo sus raíces dentro del suelo, asegurando que se establezcan nuevos sitios de contacto. Las raíces, las raicillas y los pelos radicales conjuntamente producen una extensa red en la interfase suelo-raíz (Gliessman 2002).

La raíz representa una frontera de transición para la captura de nutrimentos y, para comprender este proceso en toda su magnitud, es necesario describir el sistema radical a través de sus medidas morfológicas como longitud y diámetro radical (Comerford 1999), esto proporciona el área de superficie con el suelo y al conocer la distribución de esta área con relación a la profundidad del medio edáfico, así como la fuerza del vertedero para la absorción del nutrimento, se estará en condiciones de entender la estrecha relación que se establece entre el suelo y la planta.

Debe quedar claro que el área superficial de la raíz es la capa de transición física, a través de la cual, los nutrimentos deben pasar para poder entrar a la planta. Sin embargo, la misma superficie radical puede presentar diferencias en la morfología de la raíz (Comerford 1999). La cantidad, forma y distribución de los nutrimentos en los suelos puede también influir en la intensidad y distribución del crecimiento radical (Runsell y Allan 1992).

Si se consideran las raíces horadando y nutriéndose del suelo, y la cantidad de animales que se mueven en la superficie y en el interior de este recurso natural, entonces se hace obvio que todos los organismos, el suelo y la atmósfera, son parte de un nivel de organización más complejo, el ecosistema (Holdridge 1978). En este nivel de organización, los productores primarios son el enlace funcional principal entre la comunidad y el biotipo, en tanto, el sistema radical es el órgano trascendente para cumplir con esta función y se ve íntimamente influenciado por las propiedades del suelo, por ejemplo la elongación radical ( $E_r$ ) es máxima a la capacidad de campo del suelo.

La  $E_r$  se detiene a -1.5 Mpa, es decir, a punto de marchitez permanente, la elongación para varias especies es 1.5 Mpa (capacidad de campo) varias especies forestales se elongan por debajo de 1.5 Mpa, las raíces de algunos arbustos de zonas semiáridas presentan

elongación a -6 Mpa, las suculentas de zonas áridas producen raíces a -2.6 Mpa y la Er es máxima a -1.4 Mpa (Siegel-Issem 2002).

Se ha encontrado que la arquitectura del sistema radical de las plantas se ramifica en ambientes secos y con baja cantidad de nutrientes, mientras que en ambientes más benignos es dicotómica (Fitter *et al.* 1991). La importancia de esta plasticidad fenotípica del sistema radical ha sido reconocida, pues el despliegue de la raíz es importante para el crecimiento de la planta, desde luego, la capacidad de adquirir recursos depende de la longitud y arquitectura de la raíz en un ambiente heterogéneo como lo es el suelo (Wahl *et al.* 2001).

### **2.3 Relación suelo-planta**

En la naturaleza existen relaciones en todos niveles e individuos, estas pueden ser positivas o negativas. En los ecosistemas no existe un organismo aislado sin requerimientos externos que logren su supervivencia, por tanto se da coexistencia e interacciones en todos grados.

En las plantas se observa una relación suelo-planta desde el anclaje que este le propicia, y a su vez, el sistema radical beneficia la estructura del suelo. Según Raven *et al.* (1992) las plantas deben obtener de su entorno las materias primas específicas necesarias para las complejas reacciones bioquímicas implicadas en el mantenimiento de sus células y en el crecimiento. Además de la luz, las plantas superiores necesitan agua y ciertos elementos químicos para su metabolismo y crecimiento. Gran parte de la evolución de las plantas se ha debido a una especialización estructural y funcional para optimizar la adquisición de estas materias primas y su distribución a todas las células vivas de la planta.

Los organismos bien sean microorganismos, plantas o animales, están limitados por la disponibilidad de recursos del suelo a escalas de centímetros o kilómetros (Warren-Rhodes *et al.* 2006). Estos recursos del suelo requeridos por las plantas para el crecimiento, están heterogéneamente distribuidos en una variedad de escalas en el tiempo y espacio, en los ecosistemas naturales con significativas consecuencias ecológicas (Wilson 2000). El

crecimiento de las plantas individuales puede incrementarse hasta cuatro veces promovido por el patrón y cantidad diferente de suministro de nutrientes (Day *et al.* 2003).

Las respuestas al patrón espacial de liberación de nutrientes dependen de la especie y del patrón específico (Wijesinghe *et al.* 2001). Las raíces de muchas especies vegetales proliferan en pequeñas áreas ricas en nutrientes (Robinson *et al.* 1999), sin embargo, las especies difieren en su habilidad para seleccionar las áreas ricas en nutrientes y en la velocidad en la cual ellas pueden tomarlos cuando están disponibles (Wijesinghe *et al.* 2001). La rápida colonización de un área rica en nutrientes puede permitir a la planta tomar primero los nutrientes que un competidor (Robinson *et al.* 1999). Basados en este principio, no es sorprendente que la heterogeneidad en el suministro de recursos pueda alterar las jerarquías competitivas entre las especies (Novoplansky y Goldberg 2001), e incrementa la intensidad de competencia experimentada por las plantas (Day *et al.* 2003), se puede reflejar, por tanto, diferencias en la cobertura, composición o tamaño en las mismas, algo muy similar ocurre a nivel subterráneo de las plantas.

La relación suelo-planta, manifiesta Escamilla *et al.* (2005) se centra en la productividad del ecosistema y su relación con el suelo, siendo el sistema radical la interfase entre los recursos del suelo y la biomasa aérea producida en el ecosistema.

Las propiedades físicas de los suelos, determinan en gran medida, la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre los sujeta. Se considera necesario para las personas involucradas en el uso del suelo, conocer las propiedades físicas y químicas de éste, para entender en qué medida y cómo influyen en el crecimiento de las plantas y cómo la actividad humana puede llegar a modificarlas y comprender la importancia de mantener las mejores condiciones físicas del suelo (Rucks *et al.* 2004).

El crecimiento general de las plantas depende en muy alto grado del desarrollo del sistema radical, siempre y cuando no existan limitantes atmosféricas, biológicas, ni de nutrición mineral y suministro de agua, de este modo, sería la macroporosidad y su mayor o menor rigidez quien regulará el crecimiento de las raíces y a través de ésta el de toda la planta (Rucks *et al.* 2004).

Martínez-Casasnovas *et al.* (2009) confirman la relación entre el contenido volumétrico de humedad del perfil del suelo con el desarrollo vegetativo. Gil (2009) no refuta al mencionar que el suelo debe contar con un buen almacenaje de agua y libre movimiento de la solución del suelo para no alterar el crecimiento y actividad de las raíces, que puedan afectar el suministro hacia el resto de la planta. También hace referencia de la necesidad de contar con una buena estabilidad de agregados para una correcta entrada y circulación de agua y aire. Sin embargo, el eficiente suministro de nutrimentos no solo depende de la composición del suelo, sino también de la capacidad de intercambio catiónico que presente éste y del pH que es importante para la disponibilidad de los nutrimentos como el  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$  y el  $\text{Zn}^{+2}$ , que son más solubles a pH ácido que alcalino. En suelos ácidos hay buena disponibilidad de estos elementos, mientras que en suelos alcalinos se favorece la disponibilidad del  $\text{Ca}^{2+}$ , entre otros.

Por lo anterior, tanto propiedades físicas como las químicas, juegan un papel esencial para el establecimiento, crecimiento y distribución de las especies, sin dejar de lado, el clima y microclimas que se crean en torno de éstos, magnificando la complejidad del sistema y haciendo un conjunto de interacciones necesarias para el buen funcionamiento de la vida vegetal. Para Rodríguez y Peña (2009), los ecólogos que investigan la relación suelo-planta consideran que es la última frontera de conocimiento en ecología terrestre.

## **2.4 Características generales de las cactáceas**

Las variaciones morfológicas y fisiológicas de las plantas son muy diversas, son consecuencias del entorno en que se desarrollan. Existen plantas adaptadas a condiciones, que en otros casos son de estrés, sin embargo, han desarrollado estrategias a lo largo del tiempo que le permiten colonizar ambientes poco favorables.

Villagra *et al.* (2011) indican que la aridez, se traduce en una escasez del recurso agua, suelos someros que dificultan la penetración del sistema radical y poca disponibilidad de nutrimentos, características típicas de las zonas áridas que, en nuestro país, ocupa más del 60% de su área total. Según Miranda (1955), estas regiones son: Sonorense, Chihuahuense,

Tamaulipeca, Hidalguense, Poblana, Guerrerense, Tehuantepecana y además, otras dos regiones pequeñas, la Veracruzana y la Yucateca, con clima semiárido, que son notables por estar rodeadas por regiones muy húmedas (Bravo-Hollis 1978).

Hernández (2006) menciona que la familia de plantas suculentas más notable de México son las cactáceas, plantas autóctonas del Continente Americano (Bravo-Hollis 1978). Las cactáceas han desarrollado configuraciones variadas, desde las más pequeñas, globosas o cilíndricas del género *Mammillaria* hasta las enormes formas columnares, características del género *Neobuxbaumia*, algunas son esencialmente subterráneas (Anderson 2001) en otras existe la vida epífita o trepadora en las selvas tropicales húmedas, (Bravo-Hollis 1978; Jiménez 2011). Generalmente crecen solitarias, aunque algunas tienden a ramificarse, principalmente desde la base llegando a formar colonias como *Mammillaria compressa* (Valles 1997).

Por la estructura de los órganos vegetativos, las cactáceas constituyen una de las familias con mayores diferencias. Se distinguen de las demás plantas por algunos de sus caracteres anatómicos y fisiológicos, tales como su estructura crasa, reducción del limbo de las hojas, hipertrofia del peciolo hasta su transformación en un podario o tubérculo, modificación de las yemas hasta su conformación en areola y un metabolismo de tipo ácido crasuláceo (CAM) (Bravo-Hollis 1978).

México por sus peculiares condiciones de latitud, topografía y climas, es el país que alberga, posiblemente, la mayor cantidad de especies de cactáceas. Sin embargo, éstas por la hermosura de sus flores y formas bizarras, han sido objeto de una desmedida extracción de sus hábitats naturales convirtiéndose en una amenaza para esta familia (Bravo-Hollis 1978). El saqueo ha sido tan intenso y miles de toneladas de plantas han sido arrancadas de sus hábitats para ir a formar parte de los jardines y de los coleccionistas privados en todo el mundo (Becerra 2000), por tanto, muchas de las especies están en peligro de extinción.

## 2.5 Género *Mammillaria*

En 1812 Adrián Haworth estableció el nombre genérico para contener especies de cactáceas con tubérculos en sus tallos. El nombre que proviene del latín “mammilla” (tetilla), que hace alusión a la forma de su cuerpo (Anderson 2001), sin embargo, éste nombre se le había otorgado a un género de algas en 1809 por John Stackhouse, por este hecho se propuso que llevara por nombre el género de estas cactáceas *Neomammillaria*. No fue utilizado *Mammillaria* para las algas y en 1930 en el Congreso Internacional de Botánica se resolvió dejar este nombre con el cual se les conoce en la actualidad.

Arias *et al.* (2012) refiere que el género *Mammillaria*, es uno de los más diversos de la familia Cactaceae, con cerca de 200 especies reconocidas, situación que invita a la investigación del género siendo uno de los más estudiados, además de la gran popularidad que se tiene entre los aficionados (Anderson 2001). En la naturaleza, todas las mammillarias, salvo algunas especies, son endémicas de México, es decir, solo se pueden encontrar en dicho país. El resto se pueden localizar bordeando el sur de los Estados Unidos de América y sólo un par de especies se hallan en Centro y Sudamérica, así como en las islas del Caribe.

El género *Mammillaria* parece ser una entidad heterogénea, pues los grupos que lo integran presentan estructuras diversas que se aprecian en el tallo, en la flor y principalmente en la semilla. Se pueden reconocer fácilmente gracias al corto crecimiento que presentan, siendo generalmente de forma globosa, pueden crecer de manera solitaria y algunas especies llegan a formar grandes colonias. Una característica distintiva, para la clasificación en el género, es la presencia de savia lechosa, semilechosa o acuosa dependiendo de la especie. Sus flores vistosas nacen de las areolas axilares más viejas, sus frutos son parecidos a bayas alargadas de blanco-amarillo a rojos brillantes (Anderson 2001). Sus raíces pueden llegar a ser fibrosas o tuberosas; tallos simples o ramificados; tubérculos en series espiraladas, cilíndricos, cónicos, piramidales o gibosos, sin surco longitudinal (característica principal del género), las axilares producen flores y frutos; espinas frecuentemente diferenciadas en radiales y centrales; flores blancas, amarillas, rosadas o púrpura; frutos claviformes o globosos, rojos o verdes, carnosos o semisecos, desnudos generalmente indehiscentes; semillas orbiculares, ovadas o ampliamente ovadas, testa negra o parda (Arias *et al.* 2012).

### *Mammillaria compressa* De Candolle

Planta solitaria o con ramificación, su **tallo** es color verde grisáceo azulado, presenta látex y sus **tubérculos** son tetragonales dispuestos de 8 a 13 series; sus axilas y areolas presentan lana y cerdas blancas; no presentan **espinas radiales** y sus **espinas centrales** van de 4 a 6, blancas o rojizas y con el tiempo se tornan grisáceas, son subsanadas, aplanadas y anguladas; las **flores** son de color rosa purpúreo oscuro; su **fruto** es rojo, claviforme; **semillas** color marrón claro, globosas piriformes. Se usan principalmente como planta ornamental por sus flores vistosas (Scheinvar 2004). Se distribuye en los estados de Hidalgo, Querétaro, Guanajuato, San Luis Potosí y Tamaulipas (figura 1).



Figura 1. *Mammillaria compressa*, Municipio de Tasquillo, La Loma, Hidalgo.

*Mammillaria flavicentra* Backeb. ex Mottram

Plantas solitarias, **tallos** simples o ramificados de 5.0 a 25 cm de alto, globosos a cortamente cilíndricos, con jugo semilechoso, blanco amarillento, no espeso; **tubérculos** cónicos, circulares a ovalados en sección transversal, verdes o amarillo, las axilas presentan abundantes tricomas (lana); **espinas radiales** cerca de 14 a 24, aciculares, rectas, rígidas, radiadas, amarillas, blancas a ligeramente translúcidas; **espinas centrales** 4 a 6, subaladas, ascendentes, rectas o ligeramente curvas, amarillentas a pardo rojizo, después grisáceas, con el ápice pardo oscuro; las **flores** son pequeñas de 3 a 4 mm de diámetro de color rojo; su **fruto** claviforme de color rosa, verde blanquecino por debajo; las **semillas** de color marrón, microrrelieve reticulado (Arias *et al.* 2012). Se distribuye en Oaxaca y Puebla Pilbeam (1999), (figura 2).



Foto Ramiro Ríos Gómez

Figura 2. *Mammillaria flavicentra* Carretera Tejupan- San Cristóbal Suchixtlahuaca.

*Mammillaria dixanthoncentron* Backeb. ex Mottram

Plantas simples comunmente; los **tallos** simples o ramificados de 5.0 a 30 cm, de 7.0 a 9.0 cm hasta 25cm de ancho (Reyes *et al.* 2004), globosas a cortamente cilíndricas; presentan jugo semilechoso blanco amarillento, no espeso (Arias *et al.* 2012); axilas con abundante lana; **espinas radiales** de 13 a 25, aciculares, rectas, rígidas, radiadas, amarillas, blancas o ligeramente translucidas; **espinas centrales** de 2 a 4, subuladas, ascendentes, rectas o ligeramente curvas; las **flores** rosa a amarillo oscuro; **frutos** claviformes rojos verdosos comestibles (Reyes *et al.* 2004); las **semillas** reniformes de color pardo oscuras. En esta especie se encuentra una variación apreciable en la forma y dimensión de los tallos, en la longitud, color, grosor y número de espinas centrales (Arias *et al.* 2012). Reyes y colaboradores (2004) indican que es endémica del valle de Tehuacan-Cuicatlán y se distribuye especialmente en el estado de Oaxaca entre Teotitlán del camino y San Juan de los Cues (figura 3).



Foto Carmina Gámez

Figura 3. *Mammillaria dixanthoncentron* municipio San Juan de los Cues, Oaxaca

*Mammillaria reko* Britton & Rose.

Britton y Rose (1963) la describe como una planta de **tallo** globular a corto cilíndrico, de aproximadamente 12-15 cm de alto y 5-6 cm de diámetro, presenta lana blanca y cerdas en la axila; **espinas radiales** alrededor de 20, color blanco con delicada forma de aguja, 4 **espinas centrales** color marrón mucho más resistentes que las radiales de 10-15 mm de largo; **flores** color púrpura-verdoso; **el fruto** es de color rojo; **semilla** marrón. Especie endémica, se distribuye en el estado de Oaxaca y Puebla, especialmente en la localidad de Ixtlán de Juárez (Pilbeam 1999) (figura 4).



Figura 4. *Mammillaria reko*, municipio de Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

### III. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se centra en cuatro especies de género *Mammillaria* y tiene como finalidad dilucidar la íntima relación que guardan con el suelo. Se busca estudiarlas no como organismos individuales, por el contrario, se requiere generar información que aporte conocimiento para entender su establecimiento y desarrollo a través de interrelaciones suelo-planta.

Se parte del hecho, que no existen estudios en el género sobre este tema, lo cual resalta la importancia de esta investigación. A la par, se obtendrá nueva información del recurso suelo y valorar su relación con la planta, que sea éste el que limite la distribución de las especies dadas sus características físicas y químicas.

Por último pero no menos importante, se refiere que las mammillarias son fuente de atracción por muchos coleccionistas, en su mayoría extranjeros, que provoca un saqueo sin control, esto ubica a los organismos en alguna categoría de la Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SERMANAT-2001) y en el Apéndice II de la Convención sobre el Tráfico Internacional de Especies Silvestres de Flora y Fauna Amenazadas 2007 (CITIES). Por lo anterior es de suma importancia entender más de su establecimiento y crear en un futuro estrategias de conservación.

### IV. HIPÓTESIS

Si el suelo otorga nutrimentos, agua y las condiciones de establecimiento para las especies, se comprenderá entonces que las propiedades de este son de gran influencia para el establecimiento y distribución de las especies vegetales.

## V. OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo general

Estudiar la relación suelo-planta de cuatro especies del género *Mammillaria* a través de la caracterización del suelo, análisis del sistema radical y contenido de nutrimentos en suelo y tejido vegetal.

### 5.2 Objetivos particulares

- Caracterizar el perfil de suelo donde se desarrolla cada una de las especies.
- Describir la morfología y distribución del sistema radical de las especies a lo largo del perfil edáfico.
- Analizar la relación de los nutrimentos presentes en el suelo con los encontrados en los diferentes tejidos vegetales (raíz y tallo) de cada una de las especies.
- Explicar la relación suelo-planta de las cuatro especies.

## VI. MATERIAL Y MÉTODOS

En este apartado se describen los procedimientos y técnicas empleadas para la selección de especies y sitios, toma de muestras, traslado al laboratorio y determinaciones efectuadas en el desarrollo de la investigación relación suelo-planta en cuatro especies del género *Mammillaria*, que finaliza con el criterio adoptado para el procesamiento de datos y análisis estadístico para su interpretación.

### 6.1 Selección de especies, área de estudio y caracterización de cada sitio

Se eligieron cuatro especies, *Mammillaria compressa*, *Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria rekoii*, la selección se realizó con base en los datos obtenidos de la consulta de literatura especializada y de la información recabada de etiquetas del herbario FEZA y MEXU, además se tomaron en cuenta los siguientes criterios: una especie cuya distribución comprenda al menos tres estados del país, tres con distribución restringida a un estado o localidad, tipo de suelo, material geológico y accesibilidad a los sitios.

El área de estudio se designó de acuerdo con la localización de cada especie, *Mammillaria compressa* en los estados de Hidalgo (figura 5), Querétaro (figura 6) y San Luis Potosí (figura 7) mientras que *Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria rekoii* en el estado de Oaxaca (figura 8). A través de Google Earth se ubicaron con precisión los sitios específicos y ruta de acceso más factible, una vez hecha la selección se trazaron itinerarios al campo.

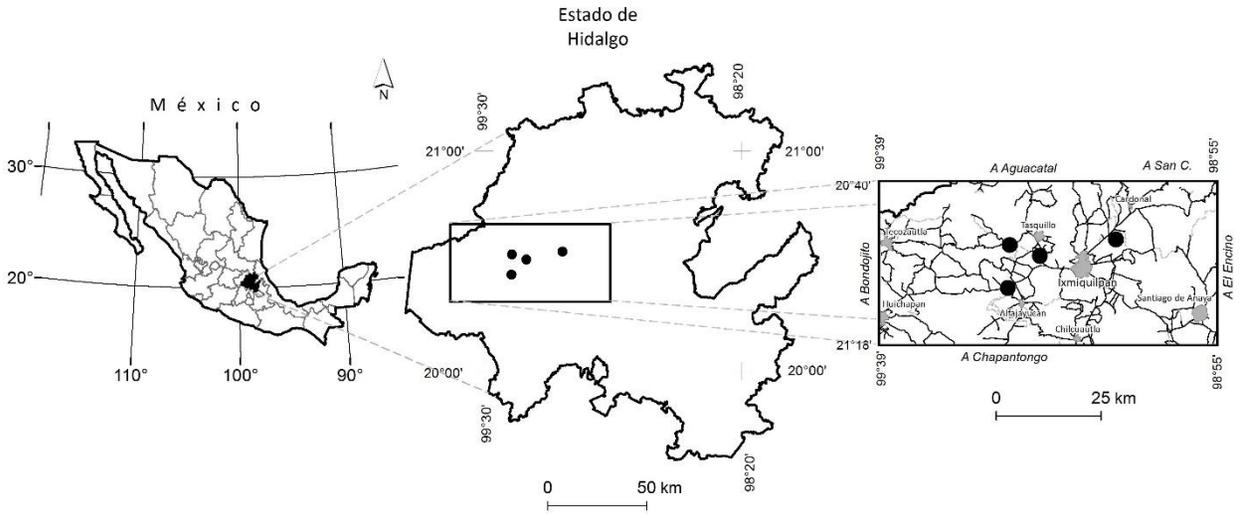


Figura 5. Mapa de localización de los sitios donde se realizó la recolecta de suelo y planta de *Mammillaria compressa* en el estado de Hidalgo.

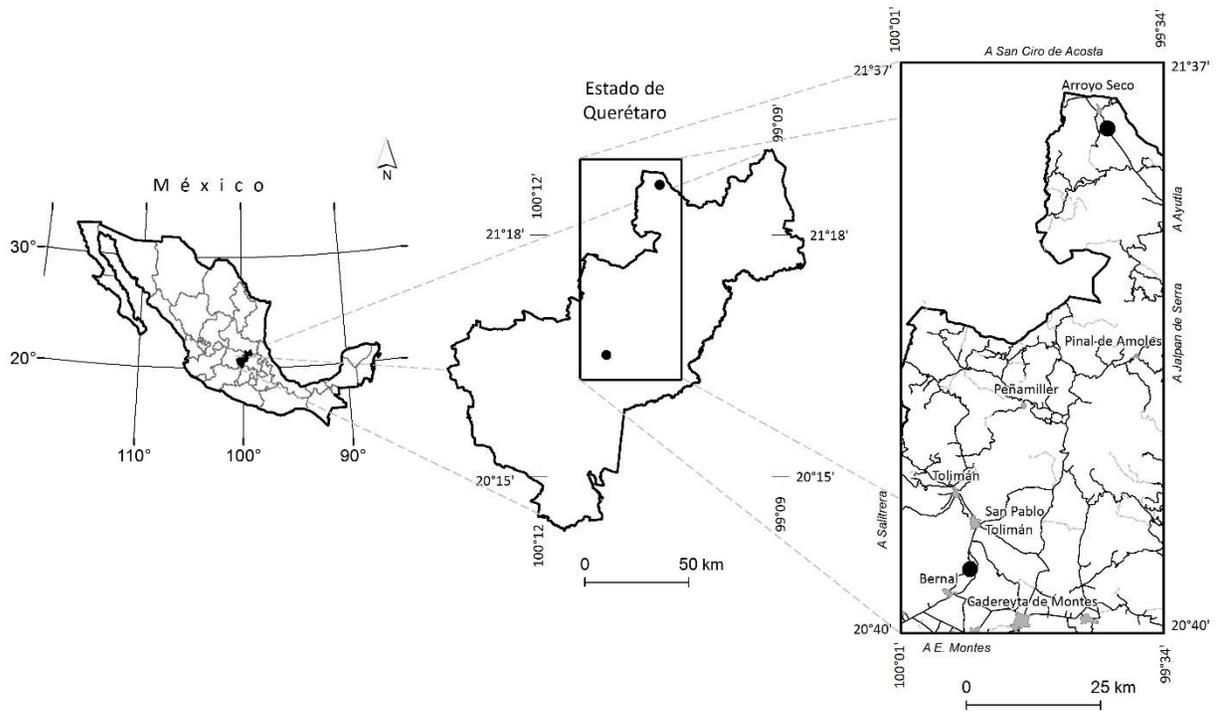


Figura 6. Mapa de localización de los sitios donde se realizó la recolecta de suelo y planta de *Mammillaria compressa* en el estado de Querétaro.

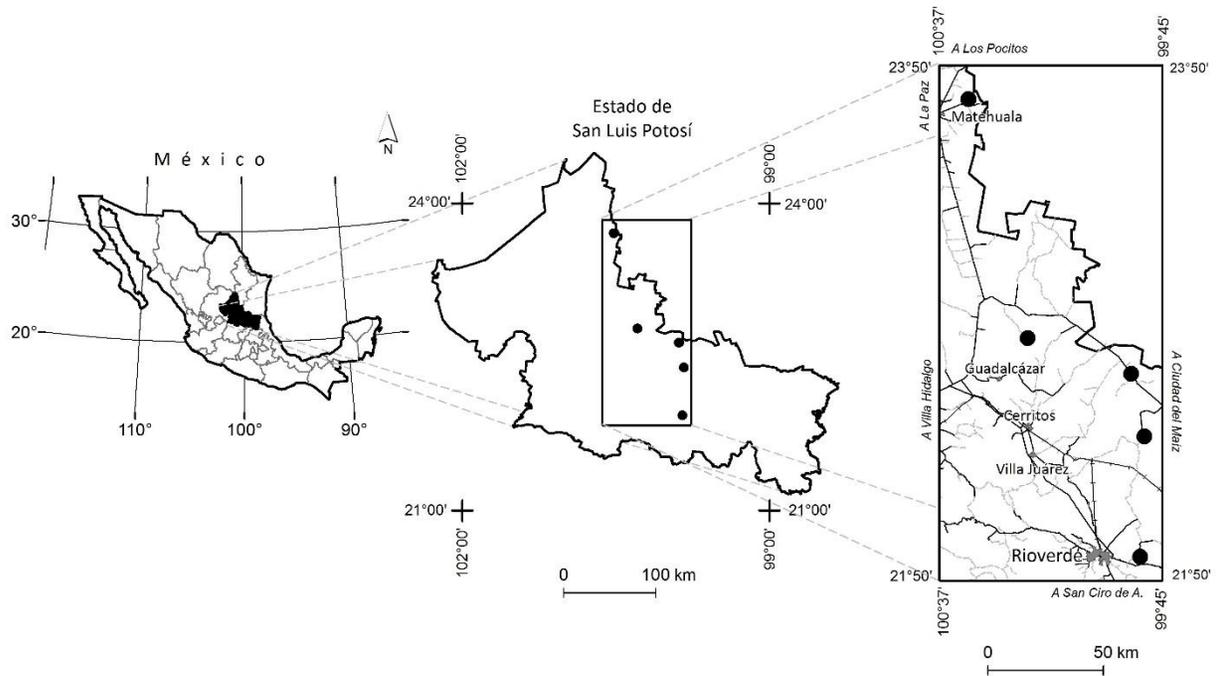


Figura 7. Mapa de localización de los sitios donde se realizó la recolecta de suelo y planta de *Mammillaria compressa* en el estado de San Luis Potosí.

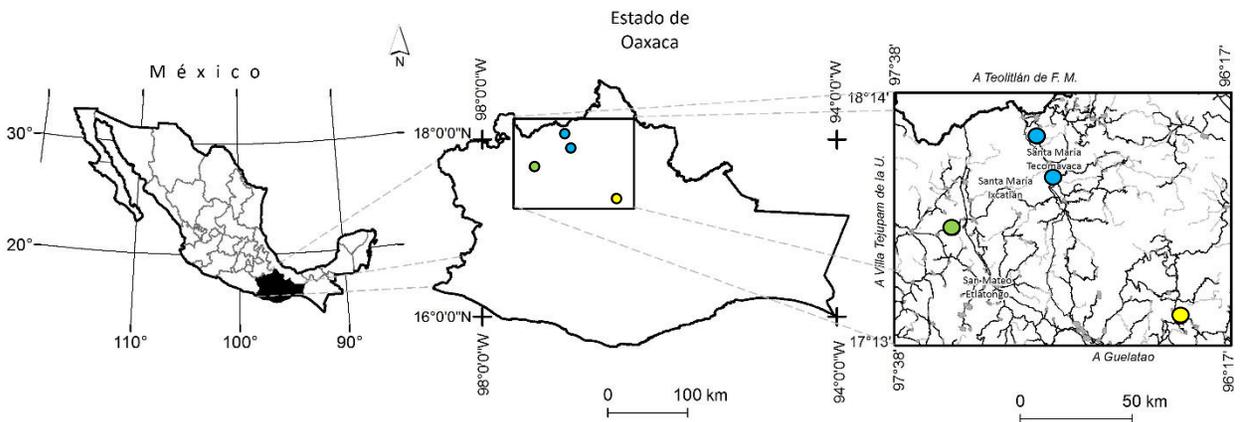


Figura 8. Mapa de localización de los sitios donde se realizó la recolecta de suelo y planta de *Mammillaria flavicentra* ●, *Mammillaria dixanthocentron* ● y *Mammillaria rekei* ●.

## **6.2 Trabajo de campo**

Se realizaron 8 recorridos por el área de distribución antes mencionadas, se georreferenciaron 16 sitios donde se localizó a alguna de las especies estudiadas donde se realizó el muestreo. En cada sitio se realizó una descripción ecológica, se tomaron datos de origen del suelo, uso actual del mismo, material geológico, drenaje superficial e interno, tipo y composición vegetal, exposición y grado de inclinación del terreno. Se tomaron datos geográficos con GPS marca Maguellan Map 130 utilizando el sistema de coordenadas geográficas.

El total de muestras que incluyen suelo y planta, fueron debidamente etiquetadas con datos geográficos, localidad y número asignado para su identificación y resguardadas en bolsas de polietileno para el suelo, cajas de cartón para tejido vegetal y bolsas de papel estraza para sistema radical. A continuación se describen las técnicas de muestreo.

### **6.2.1 Muestreo, descripción morfológica e identificación perfiles edáficos**

Se realizó la apertura de un perfil edáfico en cada uno de los tipos de suelo identificados para cada especie; posteriormente fue caracterizado morfológicamente *in situ* con la propuesta de Cuanalo de la Cerda (1990) que consistió en resaltar la variabilidad de los horizontes del suelo para obtener la mayor información.

La identificación de suelos se realizó con base en la clave de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, (WRB por sus siglas en inglés) versión 2007. Se tomaron muestras simples de dos kilogramos de cada uno de los horizontes genéticos encontrados, incluida la pedregosidad presente.

### **6.2.2 Muestreo de suelo de la zona radical**

Se tomaron muestras simples de suelo de la zona radical de cada uno de los 16 sitios que contemplan las cuatro especies con la ayuda de una pala, a las profundidades 0-10 (P<sub>1</sub>) y 10-20 cm (P<sub>2</sub>). Cabe mencionar que existieron localidades en las cuales las plantas se establecen

entre fisuras de roca o suelo muy somero, en este caso, se tomaron muestras del poco suelo mineral hallado en la profundidad máxima de 0-10 cm.

### **6.2.3 Recolecta de planta**

En cada sitio se recolectaron dos ejemplares lo más completos posible para cada especie, de preferencia no se utilizó ningún instrumento y/o herramienta para la recolecta, con la finalidad de no dañar el sistema radical, el cual se descubrió utilizando brochas y una vez visible se recolectó a mano, se limpió el exceso de suelo, se separó el sistema radical de la parte aérea con la intención de evitar la translocación de nutrimentos. El número de individuos muestreados se determinó por la densidad de la población presente en cada localidad, se consideró por supuesto, la distribución de cada una de estas.

## **6.3 Trabajo de laboratorio**

Las muestras de suelo y planta recolectadas en campo se analizaron en los laboratorios de Restauración de Suelos y de Espectrofotometría de Absorción Atómica de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM; consistió en el pretratamiento del total de muestras, caracterización física y química de cortes edáficos y suelo de zona radical y por último, determinación de nutrimentos en suelo y planta. Un ejemplar de cada especie se integró a la colección de cactáceas de la FES Zaragoza, UNAM, la determinación se realizó a través de la consulta con especialistas y cotejada con la colección del herbario MEXU, para la escritura correcta de los nombres, se consultaron en el Índice Internacional de Nombres de Plantas (IPNI por sus siglas en inglés). A continuación se detalla cada técnica empleada.

### **6.3.1 Pretratamiento de las muestras de suelo**

Previo al análisis físico y químico, las muestras simples de suelo de cada horizonte y el de ambas profundidades se extendieron para secar a temperatura ambiente, una vez que las muestras secaron fue separada la pedregosidad, así como raíces y hojas, se destruyeron los

agregados en un mortero cuidando no fragmentar las partículas minerales del suelo. Lo obtenido se pasó a través de un tamiz con malla de acero inoxidable del No. 10, equivalente a 2 mm de diámetro.

### **6.3.2 Pretratamiento de la planta**

El pretratamiento del tejido vegetal separados por organos en campo, consistió en lavado con agua desionizada durante un tiempo no mayor a diez segundos, tanto tallo y sistema radical, con el fin de excluir el suelo y las impurezas que aún contenían. La materia orgánica adherida al sistema radical se eliminó con agujas de disección bajo el lente de un estereoscópio; una vez limpio éste órgano se dividió en cinco clases diámetroales,  $D_1$  (0-0.5 mm),  $D_2$  (0.5-1 mm),  $D_3$  (1-2 mm),  $D_4$  (2-3 mm) y  $D_5$  (>3 mm), para lo cual, se utilizó un vernier.

Las muestras de raíz y tallo se secaron a temperatura ambiente para frenar los procesos enzimáticos, éstas fueron fragmentadas en porciones pequeñas (las espinas fueron descartadas en este estudio) y en un motor eléctrico marca Bel-Art Scienceware Micro-Mill Grinder with Timer, se molieron hasta obtener un fino polvo (0.05 mm o menor) que fue almacenado en bolsas de papel encerado para su conservación.

### **6.3.3 Análisis físico, químico y nutrimental del suelo y tejido vegetal**

El análisis físico, químico y nutrimental del suelo y tejido vegetal se realizó de acuerdo a los métodos convencionales que se muestran en el cuadro 1.

Cuadro1. Parámetros y métodos utilizados para la caracterización física y química del suelo y concentración de nutrientes en las diferentes muestras.

MUESTRA	PARÁMETRO	MÉTODO
Suelo de perfil edáfico y zona radical	<i>Color</i>	Comparando con cartas de colores estándar de Munsell (Munsell 1975).
	<i>Densidad aparente (DA)</i>	Del cilindro (Johnson 1979).
	<i>Densidad real (DR).</i>	Picnómetro (Johnson, 1979; Diario Oficial de la Federación. 2002, NOM-021-SERMANAT-2000).
	<i>Retención de humedad (RH)</i>	Saturación de agua y secado a 105°C (Anderson e Ingram 1993).
	<i>Textura (TX).</i>	Hidrómetro de Bouyoucos basado en la ley de Stoke (Bouyoucos, 1962).
	<i>Conductividad eléctrica (CE).</i>	Extracto de saturación AS-18 ( Jackson, 1982).
Suelo de perfil edáfico y zona radical	<i>Potencial de Hidrógeno (pH activo) y (pH potencial con KCl).</i>	Electrométrico AS-03 (Diario Oficial de la Federación. 2003, NOM-021RECNAT-2000),
	<i>Capacidad de intercambio catiónico (CIC).</i>	Versenato, pH 7 (Jackson, 1982; Reyes, 1996)
	<i>Materia orgánica (MO).</i>	Wlackley-Black (1934).
Suelo de zona radical, sistema radical y tallo	<i>Nitrógeno total (Nt).</i>	Semi-micro Kjeldhal.
	<i>Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Zn<sup>+2</sup>, Ni<sup>+2</sup>, Fe<sup>+2</sup>, Cu<sup>+2</sup>, Mn, <sup>+2</sup>, Cd<sup>+2</sup>, Al<sup>+3</sup>, Pb<sup>+2</sup>, S<sup>-2</sup> y Cr<sup>+3</sup>.</i>	Espectrofotometría de absorción atómica (EAA).

#### **6.4 Fase de gabinete**

Con los datos obtenidos de las propiedades edáficas y biológicas, se realizó un análisis exploratorio y confirmatorio de datos, se utilizaron métodos no paramétricos para el total de las variables (suelo, sistema radical y tallo). Se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para profundidades en suelo de 0-10 ( $P_1$ ) y 10-20 cm ( $P_2$ ). Para conocer el intervalo de variación de los datos, su dispersión y medidas de tendencia central se elaboraron diagramas de caja y bigote. Se correlacionaron las variables físicas y químicas del suelo. Con las medias de nutrientes de los diferentes almacenes se identificó el comportamiento a lo largo de éstos. Finalmente se realizó un análisis de Clúster con los parámetros físicos, químicos y nutrimentales del suelo. Lo anteriormente descrito se realizó con el software de análisis estadístico IBM SPSS Statistics versión 22; el análisis gráfico se realizó con el programa Statgraphics centurion XVI versión 16.1.11.

## VII. RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados de investigación bibliográfica, así como los obtenidos durante el trabajo de campo y análisis de laboratorio.

### 7.1 Tipo de vegetación

*Mammillaria compressa* se localiza con mayor frecuencia en matorral xerófilo al presentarse en siete de las once localidades muestreadas, mientras que, a *Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria rekoii* se les encontró únicamente en bosque de *Quercus*-matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio y bosque de *Quercus* respectivamente (cuadro 2).

Cuadro 2. Datos de localización y tipos de vegetación del total de sitios de las cuatro especies del género *Mammillaria*.

Especie	Loc No.	Estado	Nombre de la localidad	Coordenadas geográficas	Altitud (m)	Vegetación
<i>M. compressa</i>	1	Hidalgo	López Flores, Ixmiquilpan	20°32' 37" N 99°08' 50" W	1796	Matorral xerófilo espinoso
	2		Portezuelo, Tasquillo	20°30' 29" N 99°18' 36" W	1837	Matorral xerófilo crasicaule
	3		La loma, Tasquillo	20°31' 52" N 99°22' 32" W	1722	Bosque espinoso
	4		Presa Socea	20°26' 22" N 99°22' 45" W	1850	Matorral xerófilo crasicaule
	5	Querétaro	Tolimán	20°46' 43" N 99°54' 19" W	2065	Bosque espinoso transición m. xerófilo
	6		Arroyo Seco	21°31' 05" N 99°40' 31" W	907	Bosque tropical caducifolio
	7		Sanguijuela, Rioverde	21°55' 35" N 99°51' 04" W	1535	Bosque espinoso
	8	San Luis Potosí	Mathuala, La Soledad carretera a Dr. Arroyo	23°42' 25" N 100°31' 13" W	1610	Matorral xerófilo rosetófilo
	9		San Rafael	22°38' 19" N 99°53' 12" W	1036	Matorral xerófilo crasicaule
	10		9 km al SE de la Libertad por Brecha a Obregón	22°23' 42" N 99°50' 07" W	1045	Matorral xerófilo subinorme
	11		Guadalcázar, 1 km al O de San Agustín	22°46' 38" N 100°17' 21" W	1460	Matorral xerófilo sub montano
<i>M. flavicentra</i>	12	Oaxaca	Carretera Tejupan- San Cristóbal Suchixtlahuaca	17°41' 24" N 97°25' 03" W	2355	Bosque de <i>Quercus</i> -M. xerófilo
	13		Carretera Tejupan-San Cristóbal Suchixtlahuaca	17°41' 25" N 97°24' 39" W	2395	Bosque de <i>Quercus</i> -M. xerófilo
<i>M. dixanthoncentron</i>	14	Oaxaca	San Juan de los Cues	18°03' 32" N 97°04' 07" W	857	Bosque tropical caducifolio
	15		Desviación a Santiago Quiotepec	17°53' 54" N 97°00' 23" W	880	Bosque tropical caducifolio
<i>M. rekoii</i>	16	Oaxaca	Ixtlán de Juárez	17°20' 07" N 26°29' 33" W	2008	Bosque de <i>Quercus</i>

Localidad número Loc No.

*Mammillaria compressa* se distribuye desde los 907 y hasta los 2065 m de altitud, mientras que a *Mammillaria flavicentra* se le encontró en un intervalo de 2355-2395 m, *Mammillaria dixanthoncentron* desde 857 a los 880 m, finalmente, *Mammillaria rekoii* se le recolectó a los 2008 m de altitud.

La mayor densidad poblacional de *Mammillaria compressa* se presentó en los bosques espinosos y planicies, en éstos sitios con colonias (ramets) que alcanzaban 1.50 m de diámetro, sin embargo, también es capaz de establecerse en fisuras de rocas y en grandes pendientes con menor ramificación, de forma globosa y en interacción con individuos de los componentes de la vegetación presente; por otro lado *Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria rekoii* tiene su presencia máxima en sitios accidentados, entre fisuras de rocas; no se le encontró formando colonias, más bien solitarias (genets) con forma cilíndrica; *M. dixanthoncentron* con menor grado de interacción con otras especies respecto a *M. flavicentra* y *M. rekoii*.

## 7.2 Suelo

A continuación, se presenta la descripción de perfiles edáficos, clasificación del total de sitios, así como la caracterización física y química del suelo de la zona radical donde se establecen las cuatro especies del género *Mammillaria*.

### 7.2.1 Descripción de perfiles de suelo

Los diversos análisis indican que las condiciones edáficas donde se establecen las especies del género *Mammillaria* presentan particularidades en las propiedades físicas y químicas, de éstas, la profundidad imperó para la realización de los perfiles edáficos. *Mammillaria flavicentra* se establece en Leptosol lítico al igual que *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria rekoii* y se encuentran en peñascos preferentemente, donde la oportunidad de apertura un corte edáfico fue imposible, por tal motivo, se presentan únicamente los perfiles de *Mammillaria compressa*. A continuación se describen seis por ser representativos, Leptosol lítico, Regosol calcárico, Phaeozem vértico, Phaeozem calcárico, Leptosol esquelético, Kastanosems.

## Perfil 1. *M. compressa*. Portezuelo entrada a Santiago Ixtlahuaca, Hidalgo.

### Condiciones ambientales

Vegetación matorral xerófilo crasicale, con presencia de *Myrtillocactus geometrizans* como dominante del sitio, presentes también, *Prosopis laevigata*, *Pachycereus marginatus*, *Echinocactus platyacanthus*, *Ferocactus latispinus*, *Acacia farnesiana*, *Cylindropuntia imbricata*, *Cylindropuntia tunicata*, *Mimosa biuncifera*, *Hechtia sp.*, *Lippia graveolens*, *Echinocereus cinerascens* y *Mammillaria compressa*. Uso del suelo forestal con pastoreo limitado, pendiente de 5 % con exposición sur-oeste, drenaje superficial sitio normal, drenaje interno bien drenado, permeabilidad rápida, erosión moderada, origen del suelo *in situ*, el material geológico es roca andesita.

### Descripción morfológica

Descrito por

Gómez Barajas Carmina y M. en C. Ramiro Ríos Gómez

Ubicación

20° 28' 54'' latitud norte

Altitud

99° 17' 16'' longitud oeste

1837 m



Horizonte H; profundidad P.

H	P (cm)	
A	0-10	Color en seco 10YR 5/2 café grisáceo, en húmedo 10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro, textura migajón arcillo-arenoso, pedregosidad de un 28 % de pequeñas a medias de 5 cm de diámetro, estructura poliédrica subangular moderadamente desarrollada, con micro y macroporos representando la porosidad, éstos últimos entre y dentro de agregados, tubulares de hasta 3mm oblicuos e intersticiales, con permeabilidad rápida, raíces frecuentes abundantes de finas a medias más de 200 * 3 dm <sup>2</sup> , de hasta 3 mm de diámetro, bien drenado.
C	10-20	Color en seco 10YR 5/2 café grisáceo, en húmedo 10YR 4/2 café grisáceo oscuro, textura arena migajonosa, pedregosidad de 31 % principalmente materiales calcáreos, estructura poliédrica subangular, con micro y macroporos entre las partículas y pedregosidad, en gran parte generadas por las raíces, con permeabilidad rápida, las raíces se presentan finas y abundantes más de 200 por 3 dm <sup>2</sup> , el suelo está bien drenado.
R	20 en adelante	Carbonato de calcio continuo. Los primeros 5 cm bastante intemperizados de carbonato de calcio y entre los materiales aparecen raíces muy finas de manera abundante.

**Clasificación (WRB, 2007): Leptosol lítico**

## Perfil 2. *M. compressa*. San Nicolás, La Loma, Hidalgo

### Condiciones ambientales

Bosque espinoso con presencia de *Prosopis laevigata*, *Myrtillocactus geometrizans*, *Agave striata* y *Agave lechuguilla*, *Karwinskia humboldtiana*, *Cylindropuntia imbricata*. Uso de suelo forestal agrícola con pastoreo limitado pendiente de 5 a 6 % exposición este. La vegetación en esta localidad se encuentra bastante perturbada, drenaje superficial sitio receptor, drenaje interno bien drenado, permeabilidad rápida, erosión severa, origen del suelo aluvial, el material geológico es roca calcárea.

### Descripción morfológica

Descrito por

Gámez Barajas Carmina y M. en C. Ramiro Ríos Gómez

Ubicación

20° 31' 52'' latitud norte  
99° 22' 32'' longitud oeste

Altitud

1722 m



H P (cm)

Horizonte ocríco, color en seco 10YR 6/3 café pálido, en húmedo 10YR 4/3 café oscuro, textura arenosa, pedregosidad 10 % no mayores a 2.5 cm de diámetro, con una estructura de tipo grumosa, presenta micro y macroporos estos últimos entre y dentro de agregados e intersticiales, con permeabilidad rápida, raíces de finas a gruesas de hasta 7cm de diámetro, las finas 300 \* 3 dm<sup>2</sup>, de hasta 3 mm de diámetro, el suelo está bien drenado.

A 0-10

C 10 en adelante

Color en seco 10YR 8/3 café muy pálido, en húmedo 10YR 5/3 café, textura arenosa, pedregosidad de 8 %, el suelo está ligeramente cementado por CaCO<sub>3</sub> formando terrones endurecidos, bloques angulares de hasta 20 cm, con micro y macroporos de hasta 2mm de diámetro por acción de las raíces, con permeabilidad lenta, raíces pocas de 10 a 15 \* 3 dm<sup>2</sup> finas a gruesas de hasta 4 cm, el suelo está bien drenado.

Horizonte H; profundidad P.

**Clasificación (WRB, 2007): Regosol calcárico**

### Perfil 3. *M. compressa*. Tolimán, Querétaro

#### Condiciones ambientales

Para esta localidad se describe bosque espinoso transición matorral xerófilo, con *Acacia farnesiana* como dominante, presentes *Myrtillocactus geometrizans*, *Prosopis laevigata*, *Cylindropuntia tunicata*, *Mimosa biuncifera*, y *Mammillaria compressa*. El uso de suelo en esta localidad es forestal con pastoreo limitado, presenta una pendiente de 40 % exposición este, drenaje superficial sitio donador, drenaje interno bien drenado, permeabilidad rápida, erosión moderada, origen del suelo *in situ*, el material geológico es roca basáltica.

#### Descripción morfológica

Descrito por

Gámez Barajas Carmina y M. en C. Ramiro Ríos Gómez

Ubicación

20° 46' 43'' latitud norte  
99° 54' 19'' longitud oeste

Altitud

2065 m

H	P (cm)	
A1	0-10	Color en seco 10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro, en húmedo 10YR 2/2 café muy oscuro, textura migajón arcillo-arenosa, pedregosidad de un 20 % que van desde 2mm hasta los 40cm de diámetro, estructura poliédrica subangular bien desarrollada, con micro y macroporos dentro de los agregados éstos últimos son continuos dominando los intersticiales, de permeabilidad rápida, raíces comunes de finas a delgadas hasta 1.5 mm de diámetro más de 100 * 3 dm <sup>2</sup> , bien drenado.
A2	10-35	Color en seco 10YR 5/1 gris, en húmedo 10YR 4/1 café oscuro, textura arcillosa, pedregosidad fina de un 15 % no mayor a 5cm, estructura angular bien desarrollada, se presentan micro y macroporos, estos últimos entre agregados y en ocasiones tubulares continuos e intersticiales, permeabilidad moderada, presencia de abundantes raíces de finas de más de 200 * 3 dm <sup>2</sup> , las que presentan mayor diámetro son pocas de hasta 1.2 cm, presenta algunas concreciones de carbonato de calcio, bien drenado.
A3	35-60	Suelo húmedo, color en seco 10YR 5/1 gris, en húmedo 10YR 4/1 café oscuro, textura arcillosa, pedregosidad de 35 % estructura poliédrica bien desarrollada, micro y macroporos, éstos últimos tubulares de 0.5 mm o menores, permeabilidad lenta a moderada, raíces de finas comunes de 100 a 150*3 dm <sup>2</sup> , las gruesas muy pocas no mayores a 2mm de diámetro, bien drenado.
C	60 en adelante	



Horizonte H; profundidad P.

**Clasificación (WRB, 2007): Phaeozem vértico**

## Perfil 4. *M. compressa*. Sanguijuela, San Luis Potosí

### Condiciones ambientales

Para esta localidad se describe bosque espinoso, con *Acacia* sp., *Myrtillocactus geometrizans*, *Prosopis laevigata*, *Mimosa* sp., *Stenocereus* sp., *Castela tortuosa* y *Mammillaria compressa* principalmente. El uso de suelo en esta localidad es forestal y pecuario, presenta una pendiente de 7 % exposición noreste, drenaje superficial sitio receptor, drenaje interno bien drenado, permeabilidad rápida, erosión moderada, origen del suelo aluvial-coluvial, el material geológico es roca calcárea.

### Descripción morfológica

Descrito por

Gámez Barajas Carmina y M. en C. Ramiro Ríos Gómez

Ubicación

21° 55' 35'' latitud norte

Altitud

99° 51' 04'' longitud oeste

1535 m

H	P (cm)	
A1	0-25	Color en seco 10YR 4/2 café grisáceo oscuro, en húmedo 10YR 4/3 café oscuro, textura arena migajonosa, pedregosidad 6 %, estructura poliédrica angular y subangular, con micro y macroporos, estos últimos tubulares oblicuos de hasta 1.5 mm de diámetro, generalmente ocasionados por las raíces, también hay presencia de poros circulares de hasta 4 mm de diámetro ocasionados por fauna edáfica, con permeabilidad rápida, raíces comunes finas de hasta 2 mm de diámetro dominadas más bien por herbáceas y arbustos 50 por 3*dm <sup>2</sup> , pocas concreciones de carbonato de calcio, bien drenado
A2	25-55	Color en seco 10YR 5/2 café grisáceo, en 10YR 4/2 café grisáceo oscuro, textura migajón arenosa, pedregosidad 14% de rocas pequeñas no mayores a 1cm, estructura levemente desarrollada, con micro y macroporos estos últimos tubulares oblicuos generalmente ocasionados por las raíces de hasta 1.5 cm de diámetro y vesiculares de hasta 6 mm de diámetro, permeabilidad rápida, se presentan raíces muertas de hasta 1.5cm de diámetro , raíces comunes, finas a gruesas de hasta 3 mm de diámetro hasta 30 por 3*dm <sup>2</sup> , se presentan concreciones de carbonato de calcio de hasta 4mm de diámetro 5*dm <sup>2</sup> bien drenado.
A3	55-70	Color en seco 7,5 YR 6/2 gris rosado, en húmedo 7,5YR 5/3 café, textura migajón arenosa, pedregosidad de 39 % rocas de hasta 6 cm de diámetro, estructura particulada, micro y macroporos, los macro se presentan tubulares, permeabilidad rápida, pocas raíces finas a gruesas de hasta 1 cm en un conteo de 15*3 dm <sup>2</sup> , concreciones de CaCO <sub>3</sub> 10 * dm <sup>2</sup> bien drenado.
C	70-90	Color en seco 7,5 YR 6/2 gris rosado, en húmedo 7,5YR 5/3 café, textura migajón arenosa, pedregosidad 31 % no llegando a ser mayores de 10 cm de diámetro, material pulverulento mezclado con material de horizontes superiores (A) en una proporción 7:3, permeabilidad rápida, muy pocas raíces finas, concreciones abundantes de hasta 2 cm de diámetro, bien drenado.

Horizonte H; profundidad P.

### Clasificación (WRB, 2007): Phaeozem calcárico

## Perfil 5. *M. compressa*. La soledad, San Luis Potosí

### Condiciones ambientales

La vegetación es matorral xerófilo rosetófilo, con *Agave lechuguilla*, *Cylindropuntia tunicata*, *Prosopis laevigata*, *Hechtia* sp. y *Mammillaria compressa* principalmente. El uso de suelo en esta localidad es forestal y pecuario restringido, presenta una pendiente de 10 a 15 % exposición oeste, drenaje superficial sitio receptor, drenaje interno bien drenado, permeabilidad rápida, erosión moderada, origen del suelo aluvial-coluvial, el material geológico es roca calcárea.

### Descripción morfológica

Descrito por

Gámez Barajas Carmina y M. en C. Ramiro Ríos Gómez

Ubicación

23° 42' 25'' latitud norte  
100° 31' 13'' longitud oeste

Altitud

1610 m



H P (cm)

Color en seco 10YR 5/2 café grisáceo, en húmedo 10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro, textura arena migajonosa, pedregosidad de un 51 % de pequeñas a medias de hasta 5 cm de diámetro redondas, estructura levemente desarrollada, un 40 % del material esta suelto, polvos, el resto formando agregados cuya estabilidad está determinada por las raíces de la vegetación herbácea y arbustiva, con micro y macroporos intersticiales y continuos, permeabilidad rápida, raíces muy abundantes más de 500 \* 3 dm<sup>2</sup>, de hasta 3 mm de diámetro, suelo bien drenado.

A1 0-10

Color en seco 10YR 6/1 gris, en húmedo 10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro, textura arena migajonosa, pedregosidad de 61 % pequeñas a grandes de hasta 10 cm de diámetro, sin estructura (suelto), poros intersticiales los macroporos escasos, permeabilidad rápida a muy rápida, raíces comunes presentándose en poca cantidad aproximadamente 50\* 3 dm<sup>2</sup> con diámetro de hasta 2 mm oblicuas y pocas verticales, bien drenado.

C 10-25

Horizonte H; profundidad P.

**Clasificación (WRB, 2007): Leptosol esquelético**

## Perfil 6. *M. compressa*. San Rafael km 73, San Luis Potosí

### Condiciones ambientales

Vegetación presente matorral xerófilo crasicaule de *Pachycereus marginatus*, *Myrtillocactus geometrizans*, *Opuntia* sp., *Mimosa biuncifera*, *Cylindropuntia leptocaulis* y *Mammillaria compressa*.  
Uso del suelo Forestal pecuario, presenta una pendiente de 3 a 5 % con exposición este drenaje superficial sitio normal, drenaje interno bien drenado, permeabilidad rápida, erosión ligera, origen del suelo *in situ*, el material geológico corresponde a roca basáltica.

### Descripción morfológica

Descrito por

Gámez Barajas Carmina y M. en C. Ramiro Ríos Gómez

Ubicación

22° 38' 19'' latitud norte

Altitud

99° 53' 12'' longitud oeste

1036m



Horizonte H; profundidad P.

H  
P  
(cm)

A1 0-15

La superficie cubierta con pedregosidad, con diámetros que van desde los 5 hasta los 15 cm subangulares tipo basalto, color en seco 10YR 4/2 café grisáceo oscuro, en húmedo 10YR 3/3 café oscuro, textura migajón-arcillosa, pedregosidad de un 52 %, estructura levemente desarrollada en un 70%, poliédrica subangular, con micro y macroporos, estos últimos entre agregados y los micro intersticiales y entre partículas, de permeabilidad rápida, raíces finas a gruesas de más de 200 \* 3 dm<sup>2</sup> de hasta 10 mm de diámetro, bien drenado.

A2 15-20

Color en seco 10YR 4/2 café grisáceo oscuro, en húmedo 10YR 3/3 café oscuro, textura arcillosa, pedregosidad de 64 % de pequeñas a grandes de hasta 10 cm de diámetro, estructura poliédrica bien desarrollada, micro y macroporos oblicuos de hasta 1 mm de diámetro dentro y entre agregado, permeabilidad rápida, raíces frecuentes de finas a gruesas con diámetro de hasta 2 mm, bien drenado.

### Clasificación (WRB, 2007): Kastanozems háplico

Nota: no se cuenta con la imagen del perfil por fallas de dispositivos tecnológicos, no obstante se presenta la superficie del suelo y tener referencia del tipo del suelo del que se está abordando.

## Perfil 7. *M. flavicentra*. Carretera Tejupan-San Cristóbal Suchixtlahuaca

### Condiciones ambientales

En esta localidad la vegetación está representada por bosque de *Quercus* transición matorral xerófilo, las especies presentes principalmente son: *Hechtia* sp., *Senecio praecox*, *Opuntia* sp., *Acacia farnesiana* y *Mammillaria compressa*. Uso de suelo forestal y pecuario, pendiente 15 % exposición oeste, drenaje superficial sitio donador, drenaje interno bien drenado, permeabilidad rápida, erosión ligera, origen del suelo *in situ* el material geológico corresponde a roca basáltica.

### Descripción morfológica

Descrito por

Gámez Barajas Carmina y M. en C. Ramiro Ríos Gómez

Ubicación

17° 41' 24'' latitud norte

97° 25' 03'' longitud oeste

Altitud

2355 m

	H	P (cm)	
	O	10-0	Mantillo de espesor variable, compuesto de hojas, fragmentos de tallos y frutos en diferentes grados de descomposición muchas veces en contacto lítico y en el cual se anclan algunos de los individuos de la especie en estudio.  Color en 10YR 4/2 café grisáceo oscuro, en húmedo 10YR 2/2 café muy oscuro, textura migajón arcillosa, pedregosidad se encuentra de un 24 a 44 % dependiendo del punto, angulares, estructura bien desarrollada poliédrica subangular, con micro y macroporos, estos entre agregados, intersticiales y dentro de los agregados, oblicuos y verticales, de permeabilidad rápida, raíces comunes finas a gruesas de hasta 2 cm de diámetro aproximadamente 210 * 3 dm <sup>2</sup> , bien drenado.
	A	0-25	Roca continua con fisuras entre las cuales alguna cantidad de material suelto se ha incorporado rellenando este espacio en el cual algunas semillas de las especies en estudio han llegado a germinar y establecerse plántulas, este mismo espacio es aprovechado por las raíces de las diferentes especies de la comunidad vegetal. Roca andesita en la que se observa intemperismo en la superficie.
	R	25 en adelante	

Horizonte H; profundidad P.

**Clasificación (WRB, 2007): Leptosol lítico**

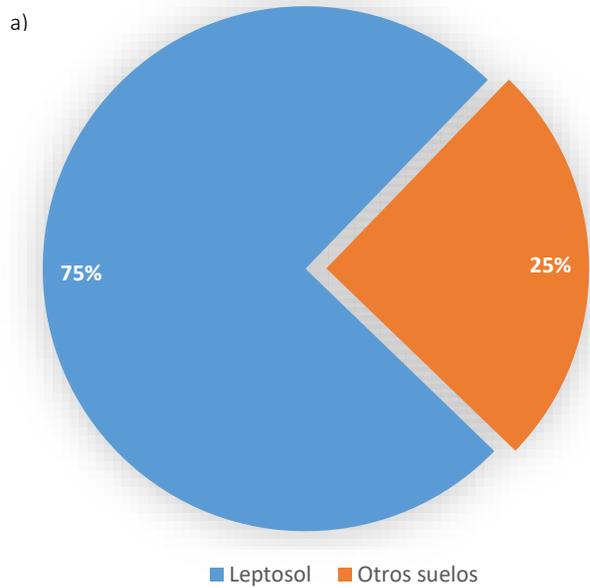
## 7.2.2 Clasificación de suelo

El cuadro 3 muestra la clasificación de los suelos para el total de localidades de las cuatro especies, el 75 % corresponde a Leptosol (figura 9a); de forma particular se resalta a *Mammillaria compressa* por presentar multiplicidad en los suelos donde se establece ya que se localizó en siete tipos, de los cuales los leptosoles representan un 63.63 % del total de suelo (figura 9b) y de forma más específica el Leptosol lítico (LP li) es el más frecuente con 37 %, seguido por Leptosol esquelético (Lp (sk)) 18 %, el resto de suelos: Phaeozem calcárico (PH (ca)) y Phaeozem vértico (PH vr), Leptosol réndzico (Lp rz), Kastanosems (Ks) y Regosol calcárico (RG (ca)) suman el 45 % (cuadro 3 y figura 9c). El material geológico presente en las localidades para esta especie exteriorizan heterogeneidad, sin embargo, roca calcárea es la de mayor aparición seguida por basalto, también presentes rocas dolomíticas y andesitas.

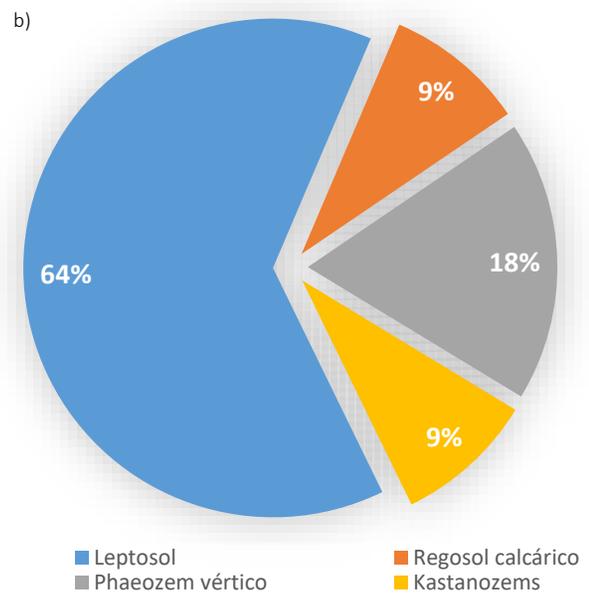
Cuadro 3. Tipos de suelo del total de localidades y origen geológico.

Loc.	Nombre de la localidad	Especie	Tipos de suelo, WRB	Abreviatura	Material geológico
1	López Flores, Ixmiquilpan	<i>M. compressa</i>	Leptosol réndzico	LP rz	Roca calcárea
2	Portezuelo, Tasquillo		Leptosol lítico	LP li	Roca andesita
3	La loma, Tasquillo		Regosol calcárico	RG (ca)	Roca calcárea
4	Presa Socea		Leptosol lítico	LP li	Roca basáltica
5	Tolimán		Phaeozem vértico	PH vr	Roca basáltica
6	Arroyo Seco		Leptosol lítico	LP li	Roca basáltica
7	Sanguijuela, Rioverde		Phaeozem calcárico	PH (ca)	Roca calcárea
8	Matchuala, La Soledad carretera a Dr. Arroyo		Leptosol esquelético	LP (sk)	Roca calcárea
9	San Rafael		Kastanosems...	KS...	Roca basáltica
10	9 km al SE de la Libertad por Brecha a Obregón		Leptosol esquelético	LP (sk)	Roca dolomítica
11	Guadalcazar, 1 km al O de San Agustín	<i>M. flavicentra</i>	Leptosol lítico	LP li	Roca calcárea
12	Carretera Tejupan- San Cristóbal Suchixtlahuaca		Leptosol lítico	LP li	Roca basáltica
13	Carretera Tejupan-San Cristóbal Suchixtlahuaca	<i>M. dixanthocentron</i>	Leptosol lítico	LP li	Roca basáltica
14	San Juan de los Cues		Leptosol lítico	LP li	Roca calcárea
15	Desviación a Santiago Quiotepec	<i>Mammillaria reko</i>	Leptosol lítico	LP li	Roca calcárea
16	Ixtlán de Juárez		Leptosol lítico	LP li	Roca metamórfica

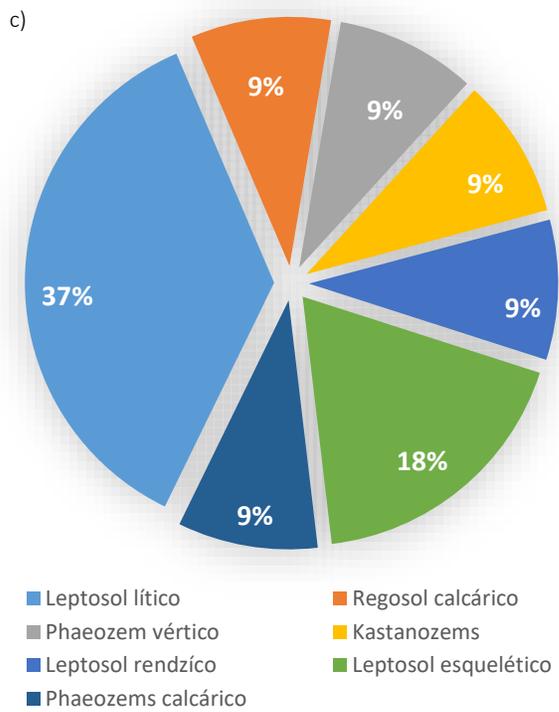
Base Referencial Mundial del Recurso Suelo **WRB**.



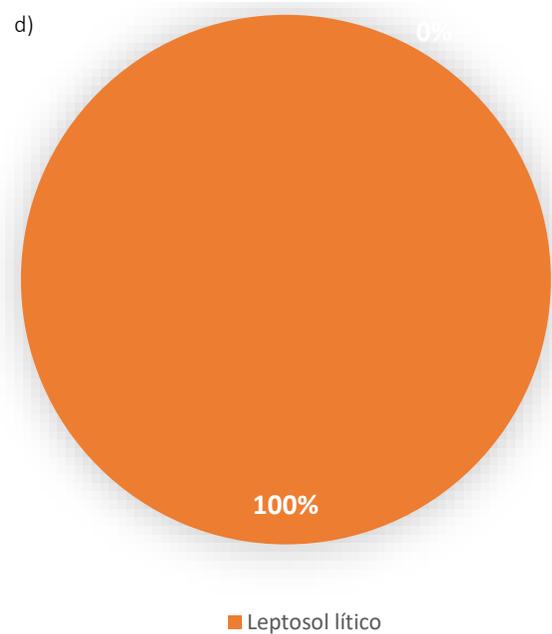
Suelos donde se establecen y desarrollan las cuatro especies de *Mammillaria* estudiadas



Leptosol, suelo de mayor porcentaje para *Mammillaria compressa*



Diversidad de suelos donde se registró a *Mammillaria compressa*



Suelo para *Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthocentron* y *Mammillaria rekoii*

Figura 9 a-d. Porcentaje de los tipos de suelo del total de localidades donde se establecen las cuatro especies del género *Mammillaria*.

Por otro lado, se registró que *Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria rekoii* presentan homogeneidad en el tipo de suelo donde se establecen, únicamente en Leptosol lítico (figura 9d). La diferencia entre ellas, radica en el origen del suelo, la primer especie referida se establece y desarrolla en roca basáltica, la segunda en roca calcárea y *M. rekoii* roca metamórfica (cuadro 3).

### 7.2.3 Caracterización física y química del suelo de la zona radical

El cuadro 4 presenta la caracterización física y química del suelo de la zona radical, se observa heterogeneidad de datos en los 16 sitios. En la mayoría de localidades con ambas profundidades 0-10 (P<sub>1</sub>) y 10-20 cm (P<sub>2</sub>), *M. compressa* presenta ambas profundidades en 10 de 11 sitios, puede observarse que los porcentajes de pedregosidad tienden a incrementar de P<sub>1</sub> a P<sub>2</sub>, se encontró en intervalos entre 10 a 83 %, el resto de localidades (12 a 16) éste parámetro oscila entre 90 y 24 %; la DA, DR, EP y RH varían poco, sin embargo, el espacio poroso y retención de humedad en la mayoría de las localidades está por encima del 50 %; nótese en granulometría que la arcilla se encuentra en menor porcentaje que arena, el limo con cantidades intermedias; se obtuvieron siete clases texturales, como dominante el migajón (M) seguida de migajón-arenosa (MA).

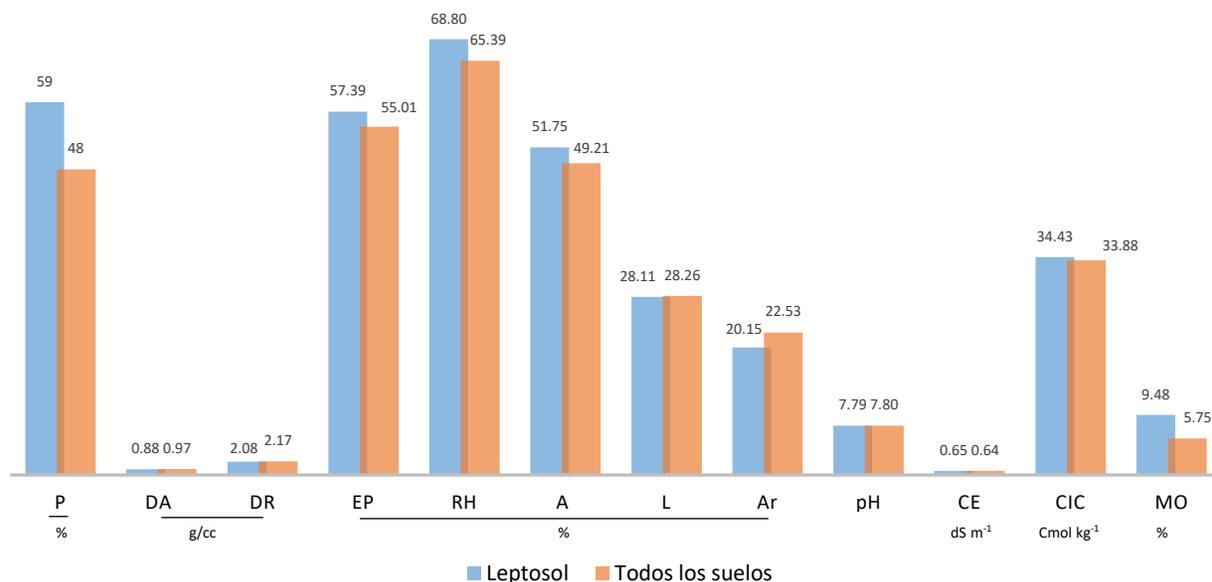
Cuadro 4. Caracterización física y química del suelo de la zona radical.

Loc.	Color		PD	DA	DR	EP	RH	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	pH	CE	CIC	MO	Clasificación de suelo
	Seco	Húmedo														
1	5YR 4/1 gris oscuro	5YR 3/1 gris muy oscuro	3.7	0.99	2.19	54.61	49.35	53.84	34.56	11.60	M	8.04	0.32	31.5	4.44	LP rz
*	5YR 5/1 gris	5YR 3/1 gris muy oscuro	1.8	1.08	2.33	53.43	51.69	46.40	29.28	24.32	M	8.25	0.33	34.00	3.07	
2	10YR 5/2 café grisáceo	5YR 3/2 café grisáceo muy oscuro	2.8	0.97	2.20	55.50	54.23	52.40	25.28	22.32	MArA	8.02	0.19	28.50	4.08	LP li
*	10YR 5/2 café grisáceo	5YR 4/2 café grisáceo oscuro	3.1	0.93	2.24	58.30	56.63	56.4	27.28	16.32	MA	8.25	0.27	32.00	4.10	
3	10YR 6/3 café pálido	10YR 4/3 café oscuro	1.0	1.23	2.08	40.48	38.74	67.84	22.56	9.60	MA	7.90	0.28	21.00	1.80	RG (ca)
*	10YR 8/3 café muy pálido	10YR 5/3 café	0.8	1.28	2.41	46.63	22.18	76.40	15.28	8.32	MA	8.38	0.16	21.50	0.41	
4	7.5YR 4/3 café oscuro	7.5YR 3/3 café oscuro	6.3	0.80	2.03	60.39	64.07	47.84	29.84	22.32	MArA	6.87	0.26	30.00	5.46	LP li
*	7.5YR 4/3 café oscuro	7.5YR 3/3 café oscuro	7.0	0.94	1.78	46.79	76.70	30.56	45.28	24.16	M	7.41	0.31	29.00	2.73	
5	10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro	10YR 2/2 café muy oscuro	5.5	1.08	2.20	50.90	66.90	61.84	15.28	22.88	MArA	7.09	0.25	31.50	5.46	PH vr
*	10YR 5/1 gris	10YR 4/1 gris oscuro	5.0	1.05	2.47	57.24	78.50	25.84	18.56	55.60	Ar	6.86	0.11	56.50	2.05	
6	10YR 4/2 café grisáceo oscuro	10YR 3/3 café oscuro	4.7	0.82	2.35	64.90	83.00	48.56	27.28	24.16	MArA	8.07	0.51	46.50	11.20	LP li
*	10YR 4/2 café grisáceo oscuro	10YR 3/3 café oscuro	8.3	1.06	2.34	54.43	81.03	47.90	28.50	23.60	MArA	8.20	0.28	40.40	4.44	
7	10YR 4/2 café grisáceo oscuro	10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro	4.0	0.92	2.35	60.68	79.80	62.56	21.28	16.16	MA	7.91	0.41	34.50	5.12	PH (ca)
*	10YR 4/2 café grisáceo oscuro	10YR 2/2 café muy oscuro	2.3	1.09	2.23	51.12	61.03	49.84	31.84	18.32	M	8.13	0.22	24.00	1.02	
8	10YR 5/2 café grisáceo	10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro	5.1	0.86	2.39	64.01	70.50	52.40	29.28	18.32	M	7.74	0.41	37.50	6.90	LP (sk)
*	10YR 6/1 gris	10YR 4/1 gris oscuro	6.1	0.86	2.43	64.35	39.60	60.40	25.28	14.32	MA	7.71	0.95	33.00	3.70	
9	10YR 4/2 café grisáceo oscuro	10YR 3/3 café oscuro	5.2	0.91	2.11	56.81	79.70	21.84	43.84	34.32	MAr	7.85	0.38	47.00	8.10	Ks ha
*	10YR 4/2 café grisáceo oscuro	10YR 3/3 café oscuro	6.4	1.01	1.61	37.36	76.00	15.84	33.84	50.32	Ar	7.36	0.19	44.50	2.05	
10	10YR 5/1 gris	10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro	7.0	0.87	1.82	51.89	79.80	45.84	30.56	23.60	M	7.90	0.32	28.50	4.40	LP (sk)
*	10YR 5/2 café grisáceo	10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro	6.3	0.85	2.30	62.82	74.30	30.40	45.28	24.32	M	8.09	0.30	25.50	5.80	
11*	10YR 2/1 negro	10YR 2/1 negro	9.0	0.65	1.65	60.60	84.50	78.56	13.28	8.16	MA	7.74	0.44	35.00	33.63	LP li
12*	10YR 4/2 café grisáceo oscuro	10YR 3/3 café oscuro	2.4	0.73	2.39	69.4	79.80	43.84	35.12	21.04	M	7.02	0.38	31.00	9.50	LP li
13*	10YR 4/2 café grisáceo oscuro	10YR 2/2 café muy oscuro	4.4	0.65	2.11	68.98	92.00	85.84	11.12	3.04	AM	7.51	0.48	48.70	14.30	LP li
14*	7.5YR 8/2 rosa claro	7.5YR 7/2 gris rosado	9.0	0.76	2.13	64.32	65.71	27.84	57.12	15.04	ML	7.63	2.18	55.00	2.07	LP li
15*	10YR 6/3 café pálido	10YR 4/3 café oscuro	5.9	1.30	2.46	47.03	47.10	66.56	29.28	4.16	MA	7.69	2.05	47.20	3.90	LP li
16*	10YR 5/2 café grisáceo	10YR 3/2 café grisáceo muy oscuro	7.9	0.84	2.19	61.33	85.10	43.84	33.12	23.04	M	7.28	1.08	46.00	10.93	LP li

Localidad **Loc.**; Pedregosidad **PD**; Densidad aparente **DA**; Densidad real **DR**; Espacio poroso **EP**; Retención de humedad **RH**; Conductividad eléctrica **CE**; Capacidad de intercambio catiónico **CIC**; Materia orgánica **MO**; Clase textural: Migajón **M**, Arcilla **Ar**, Arena **A**, Limo **L**; Profundidad de 10-20 cm \*; Localidades que no presentan profundidad de 10-20cm \*.

En cuanto al pH se tienen intervalos de 6.86 a 8.38, la conductividad eléctrica presenta homogeneidad a lo largo de las localidades sin superar la unidad, con excepción del suelo donde se establece *Mammillaria dixanthoncentron* (14<sup>a</sup> y 15<sup>a</sup>), donde se obtuvieron datos superiores a los 2 dS m<sup>-1</sup>, MO con porcentajes que van de 0.41 hasta 14.30 %, el dato extraordinario dentro de este parámetro se presenta en la localidad 11<sup>a</sup>, suelo donde se desarrolla *Mammillaria compressa* con 33.63 % (cuadro 4).

Las medias de los parámetros físicos y químicos de los leptosoles líticos donde se establece *Mammillaria compressa* se presentan en la figura 10, las propiedades con los valores más altos en orden decreciente son: pedregosidad, materia orgánica, retención de humedad, arena, espacio poroso y capacidad de intercambio catiónico, el resto de suelos se caracterizan por tener una DA, DR y arcilla más altas.



Pedregosidad **P**; Densidad aparente **DA**; Densidad real **DR**; Espacio poroso **EP**; Retención de humedad **RH**; Arena **A**; Limo **L**; Arcilla **Ar**; Conductividad eléctrica **CE**; Capacidad de intercambio catiónico **CIC**; Materia orgánica **MO**.

Figura 10. Medias de las propiedades físicas y químicas de los suelos donde se establece *Mammillaria compressa* y la diferencia con leptosoles.

#### 7.2.4 Diferencias en el suelo de *Mammillaria compressa* entre 0-10 y 10-20 cm de profundidad

Se realizó una prueba de Kruskal-Wallis, se probó la hipótesis nula que las propiedades físicas y químicas entre las dos profundidades ( $P_1$  y  $P_2$ ) del suelo donde se establece *Mammillaria compressa* no presentan disimilitud, excepto en materia orgánica, dado que el valor de  $p$  es mayor a 0.05, con un nivel de confianza del 95.0 % (cuadro 5).

Cuadro 5. Prueba de Kruskal-Wallis. Muestra las diferencias significativas entre 0-10 y 10-20 cm de los suelos de *Mammillaria compressa*.

Propiedades	PD	DA	DR	EP	RH	A	L	AR	pH	CE	CIC	MO
	%	(g/cc)		%						dSm-1	Cmol/kg-1	%
Significancia	.762	.130	.256	.406	.545	.290	.650	.344	.226	.650	1.00	.008

Pedregosidad **PD**; Densidad aparente **DA**; Densidad real **DR**; Espacio poroso **EP**; Retención de humedad **RH**; Arena **A**; Limo **L**; Arcilla **Ar**; Conductividad eléctrica **CE**; Capacidad de intercambio catiónico **CIC**; Materia orgánica **MO**.

La MO de ambas profundidades de los suelos donde se establece *Mammillaria compressa* fue la única propiedad que presentó diferencia significativa de 0.008 (cuadro 5). En la figura 11 se muestra esta disimilitud, en la primer profundidad que corresponde a 0-10 cm

los porcentajes van de 4.77 a 6.76 con una media de 5.77 % mientras que de 10-20 cm se tiene una mínima de 1.94, máxima de 3.93 y media de 2.94 % .

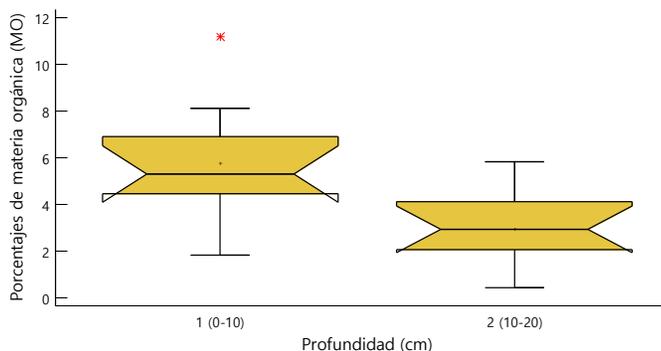


Figura 11. Diferencias entre profundidades en los porcentajes de materia orgánica de los suelos donde se establece *Mammillaria compressa*.

Los subsecuentes resultados se presentan utilizando datos únicamente de la profundidad de 0-10 cm ( $P_1$ ) al no evidenciar diferencias significativas como lo mostró la prueba de Kruskal-Wallis, así mismo se tomó esta decisión para no excluir los datos de las tres especies que no se establecen en suelos con una profundidad mayor a 10 cm, en este caso los suelos de *Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria reko*.

### 7.2.5 Medias de las propiedades físicas y químicas de los suelos

De la comparación de las medias de las diferentes propiedades físicas y químicas de los suelos se observa que donde se establece *Mammillaria dixanthoncentron* contienen el mayor porcentaje de pedregosidad (PD), densidad aparente (DA), densidad real (DR), conductividad eléctrica (CE) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) (81 %, 1.03 y 2.30 g/cc, 2.14 dS m<sup>-1</sup> 51.10 Cmol kg<sup>-1</sup> respectivamente). En caso contrario, ésta especie se encontró sobre condiciones edáficas con los porcentajes más bajos en espacio poroso (EP), retención de humedad (RH), arcilla (Ar) y materia orgánica (MO) (55.74, 56.40, 9.60 y 2.99 % respectivamente) como se muestra en la figura 12 a-j.

Por otro lado, los suelos donde se encuentra *Mammillaria reko* encabeza los porcentajes de RH y Ar, (85.10 y 23.04), mientras que la parte mineral sustentante de *Mammillaria flavicentra* EP y MO (69.33 y 11.91 %), mismos suelos que presentaron los datos más bajos en PD, DA y pH (34 %, 0.69 g/cc y 7.27). Los suelos donde se establece *Mammillaria compressa* presentan la CIC más baja respecto al resto (33.77 Cmol kg<sup>-1</sup>).

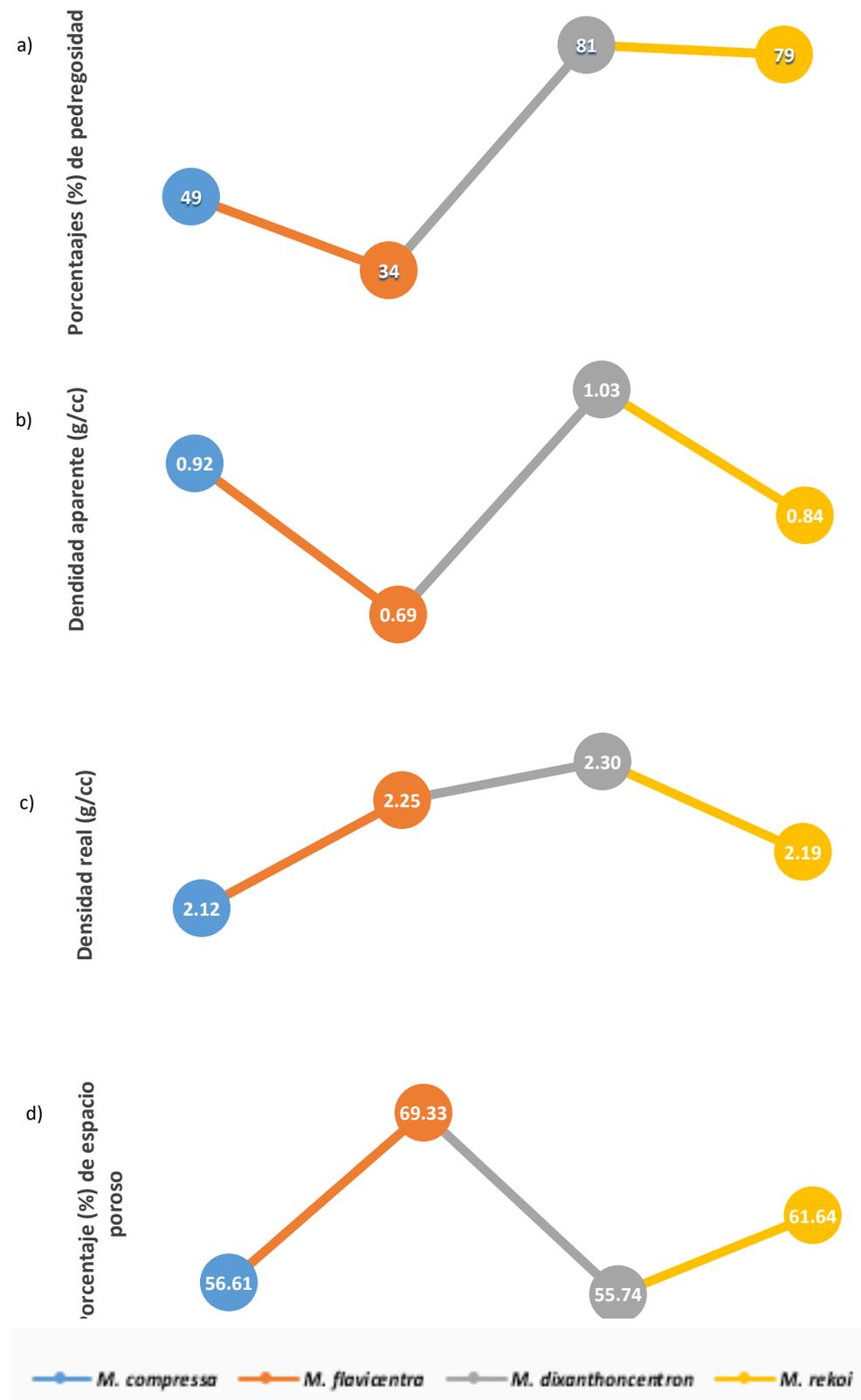
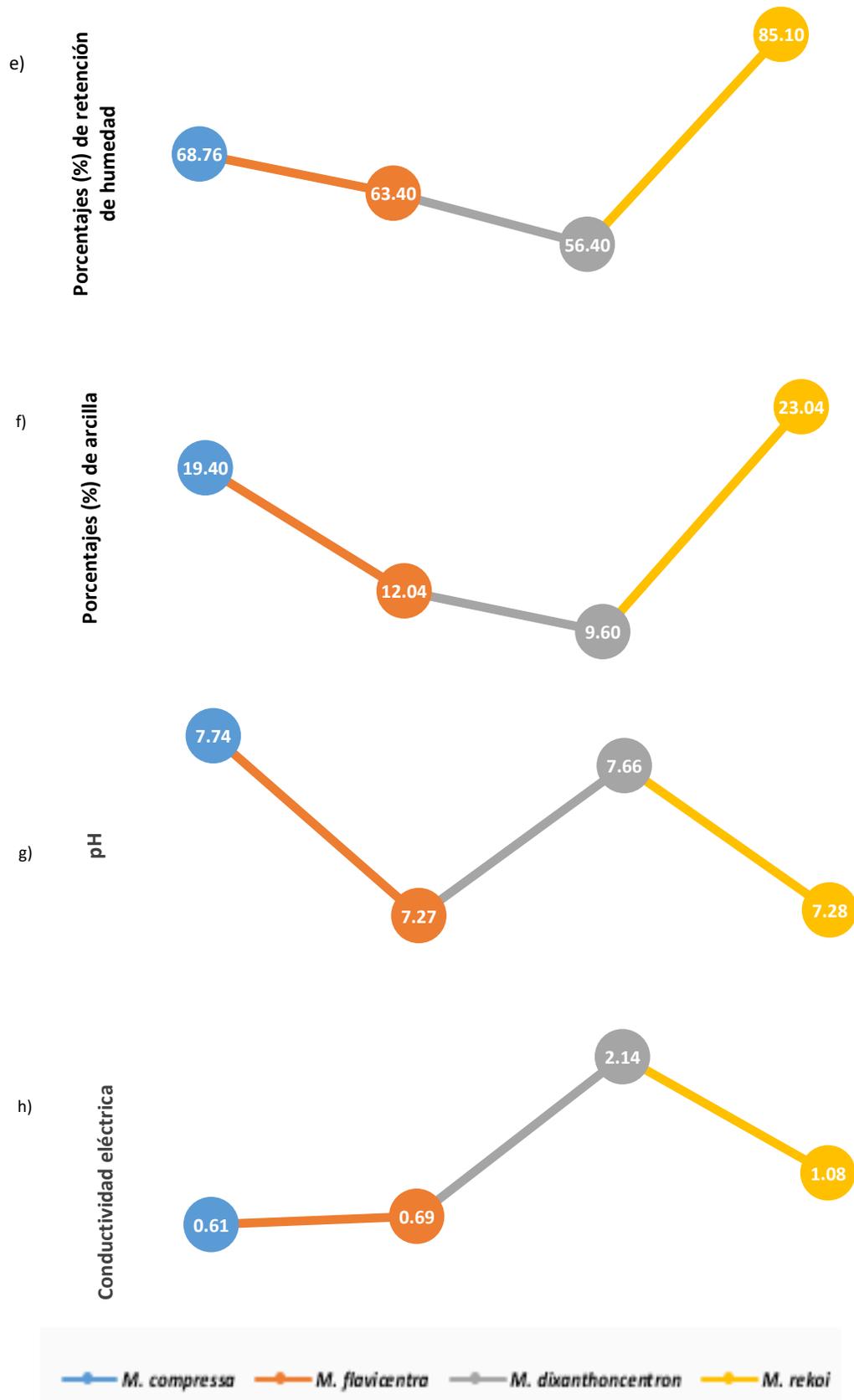
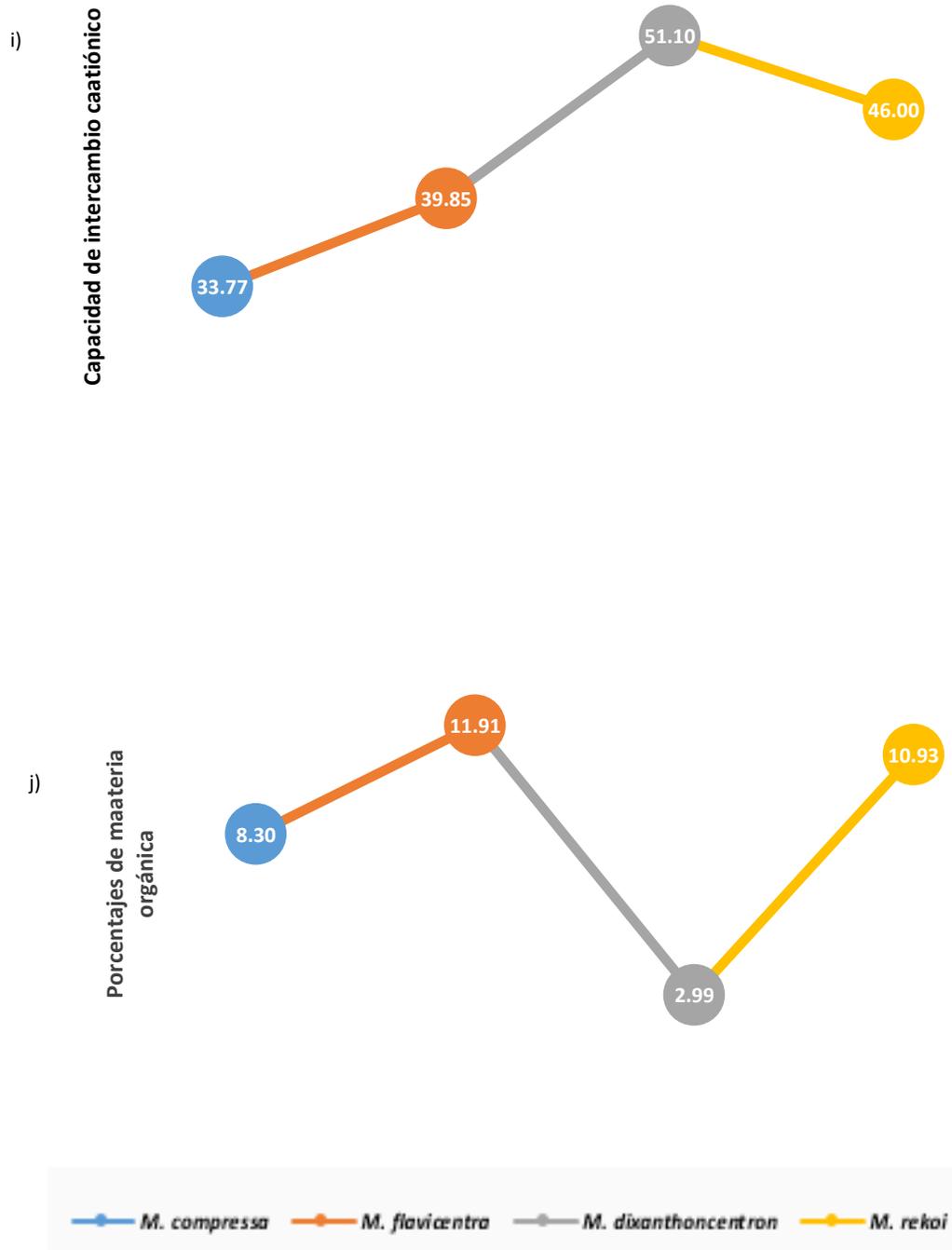


Figura 12 a-j. Comparación de medias de las propiedades físicas y químicas del suelo donde se establecen las especies del género *Mammillaria*.



Continuación figura 12 a-j. Comparación de medias de las propiedades físicas y químicas del suelo donde se establecen las especies del género *Mammillaria*.



Continuación figura 12 a-j. Comparación de medias de las propiedades físicas y químicas del suelo donde se establecen las especies del género *Mammillaria*.

## 7.2.6 Correlaciones de rangos de Spearman

Para establecer si las propiedades físicas y químicas del suelo de la zona radical de P<sub>1</sub> (0-10 cm) se relacionan entre sí, se elaboraron correlaciones de rangos de Spearman, los resultados se muestran en el cuadro 6. Se puede observar existe correlaciones positivas y negativas estadísticamente significativas en nivel de 0.05 y 0.01 bilateral, se presentan sólo los casos con significancia. Nótese correlaciones entre DA-EP y DA-MO, éstas de forma inversa lo que origina el signo negativo, con un nivel de 0.01, en tanto el resto de casos presentan correlaciones positivas con significancia de 0.05.

En el cuadro 7 se muestra el valor de coeficiente de correlación e intervalo donde se manifiesta e interpreta. Con lo anterior se presentan relaciones con diferente intensidad entre las propiedades de los suelos donde se establecen las diferentes especies. Una fuerte correlación se encuentra entre espacio poroso (EP) y densidad aparente (DA) con un coeficiente de 0.827; el resto de correlaciones se encuentran entre 0.52 y 0.67 lo que indica una modesta correlación (cuadro 6 y 7).

Cuadro 6. Correlaciones de las propiedades físicas y químicas del suelo de la zona radical.

	Propiedades	EP	MO	Ar
Coefficiente de correlación	DA	-0.827**	-0.672**	-
Significancia		0.000077	0.004	-
Coefficiente de correlación	MO	0.630*	-	-
Significancia		0.009	-	-
Coefficiente de correlación	RH	-	0.525*	0.527*
Significancia		-	0.037	0.036

\*La correlación es significativa en el nivel 0.05

\*\*La correlación es significativa en el nivel 0.01

Densidad aparente **DA**; Espacio poroso **EP**; Materia orgánica **MO**; Retención de humedad **RH**; Arcilla **Ar**; Sin correlación -

Cuadro 7. Grado de correlación presente entre variables (Fowler *et al.* 1998).

Valor de p	Grado de correlación
0.00-0.19	Muy débil
0.20-0.39	Débil
0.40-0.69	Modesta
0.70-0.89	Fuerte
0.90-1.00	Muy fuerte

Se realizaron diagramas de caja y bigotes para señalar aquellas propiedades físicas y químicas del suelo que presentan diferencias significativas y observar el comportamiento de los datos entre especies. Cabe señalar que *Mammillaria rekoii* al presentar un dato no se logró hacer el diagrama de caja y bigotes, empero, se presenta el dato dentro del gráfico para realizar una comparación inferencial con el resto de las especies.

La densidad aparente (DA) presentó diferencia entre el suelo de *Mammillaria compressa* y *Mammillaria rekoii* con el suelo de *M. flavicentra*, ésta desigualdad se debe a que los suelos donde se establece ésta última especie presenta la DA más bajas (figura 13a).

El espacio poroso (EP) presentó una clara disimilitud entre los suelos de *M. compressa* y *M. dioxanthocentron* y *M. rekoii* versus los de *M. flavicentra* al presentar los porcentajes más altos respecto a las tres especies restantes (13b).

La parte mineral donde se establece *M. compressa* presentó los pH más elevados, superiores a 8 (salvo los datos extraordinarios). Por su parte los suelos de *M. flavicentra* y *M. dioxanthocentron* presentaron máximos de 7.51 y 7.69 respectivamente (13c), mientras que *M. rekoii* obtuvo un pH de 7.28.

La conductividad eléctrica (CE) es la propiedad que presenta diferencias más evidentes entre los suelos donde se establecen las especies, donde crece *M. dioxanthocentron* se tienen los datos más altos (por arriba de  $2 \text{ dS m}^{-1}$ ), con esto dista de los tres suelos restantes de las tres especies, empero el de *M. compressa* y *M. flavicentra* semejantes entre sí (figura 13d).

Adviértase que, los suelos minerales donde crece *M. dioxanthocentron* presentaron las CIC más cuantiosas de hasta  $55.03 \text{ Cmol kg}^{-1}$  mientras que *M. compressa*, *M. flavicentra* y *M. rekoii* no rebasan los 37.52, 48.71 y 46.01  $\text{Cmol kg}^{-1}$  respectivamente (13e).

Finalmente los porcentajes de materia orgánica (MO) de los suelos donde se establecen las especies presentaron disimilitud, *M. dioxanthocentron* con una media de 2.98, en tanto que los de *M. flavicentra*, *M. rekoii* y *M. compressa* con una media de 11.90, 10.93 y 8.30 % respectivamente, existe un dato extraordinario en los suelos de esta última especie que corresponde a 33.63 (13f).

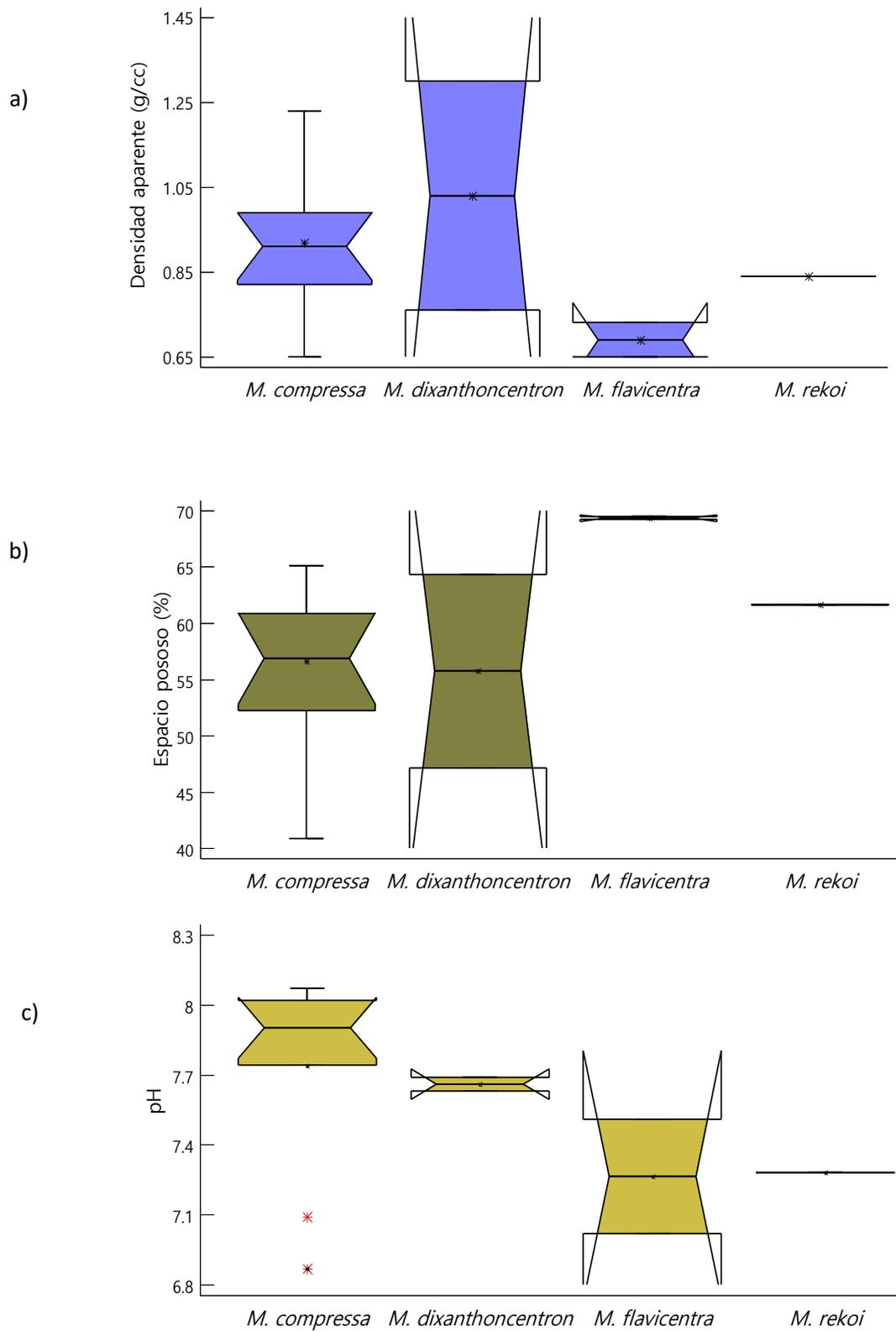
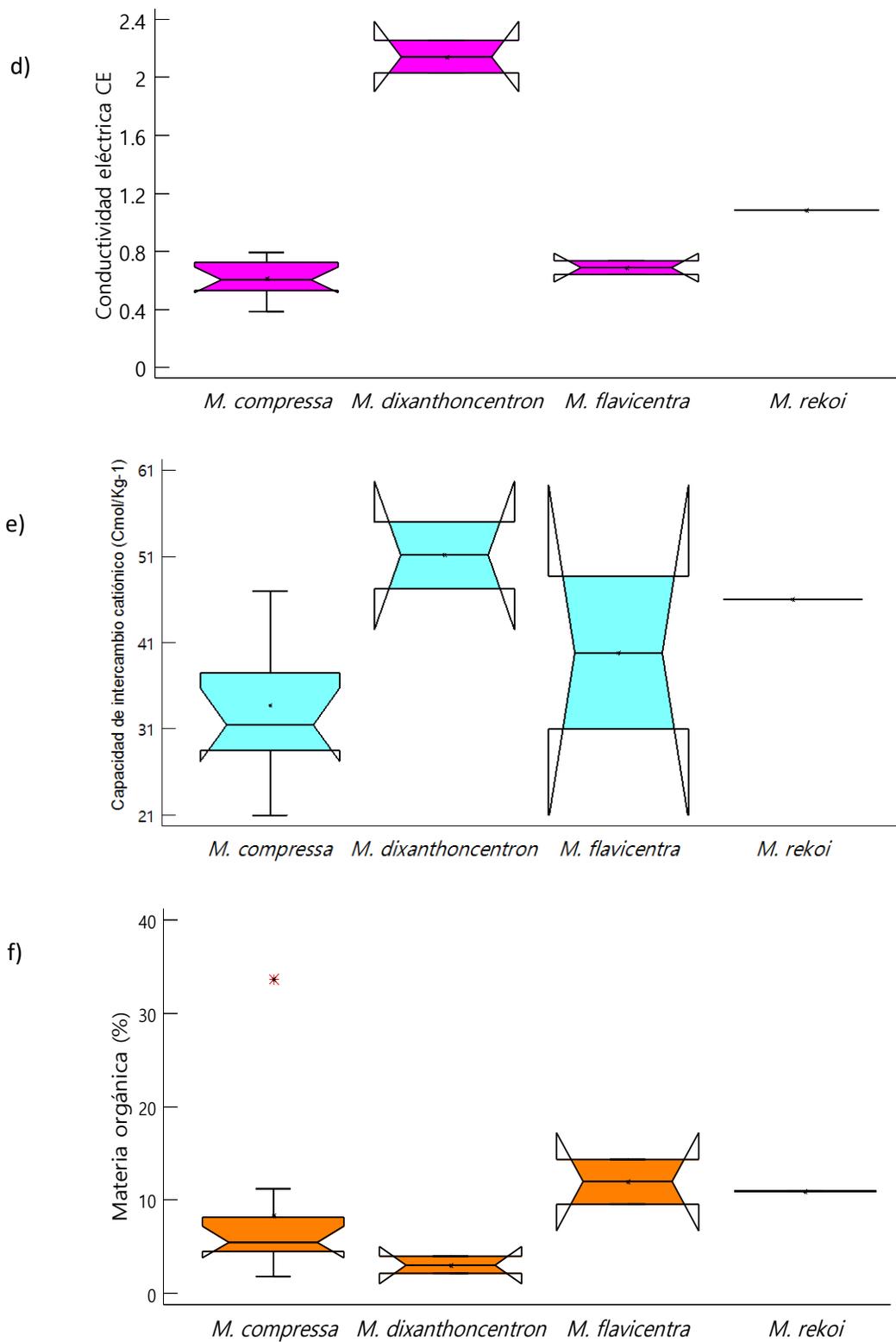


Figura 13 a-f. Diagramas de caja de las propiedades físicas y químicas del suelo que muestran las diferencias significativas entre las especies del género *Mammillaria*



Continuación figura 13 a-f. Diagramas de caja de las propiedades físicas y químicas del suelo que muestran las diferencias significativas entre las especies.

### 7.2.7 Análisis de Cluster

En la figura 14 se muestra la máxima homogeneidad y la mayor diferencia entre especies mediante el análisis de Clúster realizado con las propiedades físicas y químicas del suelo. En este reconocimiento de patrones se advierte la cercanía de *M. compressa* y *M. rekoii* en las propiedades DR, DA, porcentaje de arcilla y materia orgánica, le continúa *M. flavicentra*; finalmente la parte mineral que sustenta a *M. dixanthoncentron* es la más alejada al sólo parecerse en EP y pH.

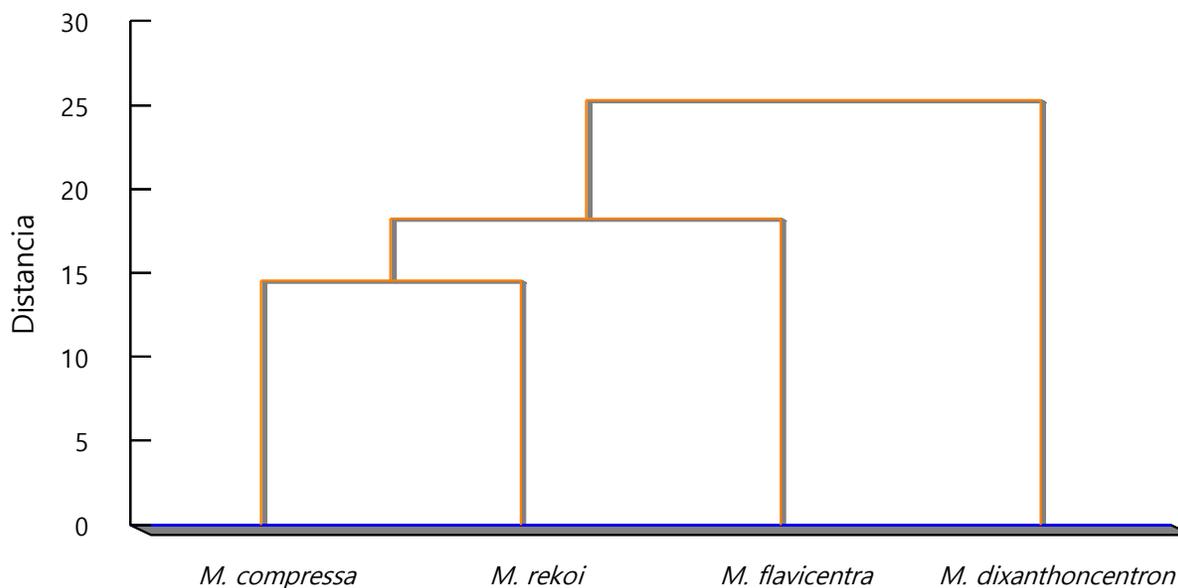


Figura 14. Prueba de Clúster emparentando los suelos por sus propiedades físicas y químicas.

### 7.2.8 Concentración de nutrientes en suelo, Kruskal Wallis y correlaciones rangos de Spearman

El nitrógeno total (Nt) se encontró en un intervalo de 0.07 a 1.54 % en los diferentes suelos, la concentración del resto de los nutrientes ordenados en forma decreciente es:  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Pb^{+2}$ ,  $Se^{-2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Na^+$ ,  $Cr^{+3}$ ,  $Mn^{+2}$ ,  $Al^{+3}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $Zn^{+2}$ ,  $Ni^{+2}$  y Cd (cuadro 8).

*Mammillaria compressa* presenta intervalos más amplios de las concentraciones de los diferentes nutrientes, como ejemplo, Ca (1.65 a 42.27 g kg<sup>-1</sup>), entre otros, le sigue *Mammillaria dixanthoncentron* principalmente en,  $Mg^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$  y  $Al^{+3}$ ; caso contrario *Mammillaria flavicentra* con datos muy homogéneos entre localidades, excepto  $Fe^{+2}$  (cuadro 8).

Al tomar las medias de los iones considerados macronutrientes se tiene la siguiente secuencia creciente para cada una de las especies, *Mammillaria compressa*  $Mg^{+2} < K^+ < Ca^{+2}$ , *Mammillaria flavicentra*  $Mg^{+2} < Ca^{+2} < K^+$ , *Mammillaria dixanthoncentron*  $Mg^{+2} < Ca^{+2} < K^+$  y *Mammillaria rekoii*  $Ca^{+2} < Mg^{+2} < K^+$ , con lo anterior se advierte que el  $Mg^{+2}$ , es el de menor concentración en los suelos de tres especies, el  $Ca^{+2}$  con mayor frecuencia después de éste (cuadro 8).

Los nutrientes que presentan similitud en las concentraciones entre los suelos donde se establecen las especies del género *Mammillaria* con un valor  $p$  mayor a 0.05 son,  $Mg^{+2}$ ,  $K^+$ ,  $Ni^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Cd^{+2}$ ,  $Al^{+3}$ ,  $Pb^{+2}$  y  $Se^{-2}$ ; en tanto que Nt,  $Ca^{+2}$ ,  $Na^+$ ,  $Zn^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$  y  $Cr^{+3}$  presentan un valor  $p$  igual o menor a 0.05. A continuación se describen aquellos que presentan disimilitud.

Nt con valor  $p$  de 0.05, las disimilitudes se hallan entre la parte mineral donde se encuentra *Mammillaria compressa* y *Mammillaria dixanthoncentron*, además *Mammillaria rekoii* sin similitud con el resto de especies (cuadro 8). Por otro lado, *Mammillaria flavicentra* y *M. dixanthoncentron* difieren en la concentración de  $Ca^{+2}$ , con un valor  $p$  de 0.03, la primera no supera 3.66 g kg<sup>-1</sup>, mientras que *M. dixanthoncentron* alcanza 22.83 g kg<sup>-1</sup> (cuadro 8 y 9).

Se puede advertir que *Mammillaria compressa* y *Mammillaria flavicentra* difieren claramente de *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria rekoii* en la concentración de  $Na^+$  (valor  $p$  de 0.04), la primer pareja de especies no superan las 1.10 (promedio) g kg<sup>-1</sup>, en tanto que las especies restantes no inferiores de 3.44 g kg<sup>-1</sup> (cuadro 8 y 9).

Adviértase que el parámetro  $Zn^{+2}$  existe una disimilitud entre *Mammillaria compressa* y *Mammillaria dixanthoncentron* (promedios: 82.5 y 120 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente), con una mayor lejanía se encuentra *M. rekoii* (159.53 mg kg<sup>-1</sup>) que difiere con las tres especies restantes, se reporta un valor  $p$  de 0.04. Para  $Cu^{+2}$  se obtuvo valor  $p$  de 0.04, este se origina a partir de la diferencia de *M. compressa* respecto a *M. dixanthoncentron* y *M. rekoii*. La primer especie presenta valores mínimos de 55.75 82.5 mg kg<sup>-1</sup>, las restantes no se encuentran por debajo de 241 mg kg<sup>-1</sup> (cuadro 8 y 9).

Las diferencias significativas en  $Mn^{+2}$  son corroboradas por el valor  $p$  de 0.01 de la prueba de Kruskal Wallis (cuadro 9), *Mammillaria rekoii* y *Mammillaria dixanthoncentron* son las únicas especies que se asemejan (valores cercanos a 500 mg kg<sup>-1</sup>), por ende *Mammillaria compressa*, *M. flavicentra* y *M. dixanthoncentron* difieren entre ellas (valor  $p$  de 0.01). Los suelos donde se establece *M. compressa* presenta un intervalo mayor en la concentración en  $Cr^{+2}$  (de 2 a 2980.0 mg kg<sup>-1</sup>); en este se tiene un valor  $p$  de 0.05 que proviene de *M. compressa* y *M. dixanthoncentron*, (cuadro 8).

Cuadro 8. Concentración de nutrimentos en los suelos donde se establecen las especies del género *Mammillaria*.

Localidad	Nt	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Zn <sup>+2</sup>	Ni <sup>+2</sup>	Fe <sup>+2</sup>	Cu <sup>+2</sup>	Mn <sup>+2</sup>	Cd <sup>+2</sup>	Al <sup>+3</sup>	Pb <sup>+2</sup>	Se <sup>-2</sup>	Cr <sup>+3</sup>	
	%	g/kg <sup>-1</sup>					mg/kg <sup>-1</sup>									
1	López flores	1.19	1.97	2.54	2.12	0.50	51.70	53.00	1370.00	55.75	692.75	4.00	432.50	57.50	3375.00	27.50
	Portezuelo	0.14	2.19	1.04	8.54	1.07	53.13	42.75	2515.00	82.50	701.50	3.50	410.00	25.00	1167.50	2.00
	San Nicolás	0.07	1.65	1.37	9.00	0.93	58.90	57.25	2095.00	101.25	809.25	1.50	407.50	175.00	2325.00	22.50
	Presas Socea	0.35	1.52	0.50	8.11	3.80	68.83	54.25	2070.00	105.25	664.50	5.00	480.00	4225.00	2375.00	652.50
	Tolimán	0.28	1.58	2.18	26.19	3.28	122.73	76.50	6447.50	253.50	1308.00	3.25	1322.50	5950.00	5850.00	2205.00
	Arroyo seco	0.56	23.54	9.16	26.42	0.20	104.63	119.75	4450.00	292.50	691.00	3.50	1872.50	5700.00	6350.00	2980.00
	Sanguijuela	0.21	4.93	0.41	18.76	0.40	75.73	71.50	1722.50	157.50	823.75	7.00	562.50	6225.00	5050.00	677.50
	Matehuala	0.42	37.91	2.78	18.98	0.58	99.23	92.50	4197.50	184.25	1191.75	5.50	1640.00	6375.00	4625.00	880.00
	San Rafael	0.21	3.24	0.73	24.24	0.42	88.83	62.00	1405.00	189.00	964.50	4.50	720.00	6425.00	4350.00	1350.00
	Brecha a Obregón	0.42	42.27	2.36	23.36	0.35	96.35	73.25	457.50	206.50	1102.25	5.75	832.50	6250.00	6400.00	1162.50
2	San Agustín	1.61	11.22	2.07	22.00	0.54	98.73	82.25	615.00	218.00	340.00	4.25	2.50	5825.00	3950.00	1447.50
	San Cristobal Suchixtlahuaca	0.21	2.20	2.46	22.70	0.86	103.88	74.50	4940.00	231.25	1069.00	4.75	240.00	6175.00	5350.00	1607.50
3	San Cristobal Suchixtlahuaca	0.07	3.66	2.22	22.42	0.76	119.63	71.75	1402.50	241.75	1210.25	4.50	157.50	6225.00	5775.00	1867.50
	San Juan de los Cues	0.14	22.83	1.77	22.73	3.50	92.55	68.25	2857.50	241.00	551.75	3.00	240.00	5800.00	5900.00	1635.00
4	Quiotepec	0.16	11.99	16.60	32.36	3.32	145.88	103.00	8295.00	265.25	632.50	4.25	2285.00	6050.00	4750.00	2487.50
	Ixtlán de Juárez	1.54	3.71	9.15	22.93	3.55	159.53	77.75	5462.50	267.25	571.25	2.00	545.00	6275.00	3112.50	2180.00

*Mammillaria compressa* 1; *M. flavicentra* 2; *M. dixanthocentron* 3; *M. rekoii* 4; Hidalgo ●; Querétaro ●; San Luis Potosí ● y Oaxaca ●.

Cuadro 9. Prueba de Kruskal Wallis. Se muestran las diferencias entre especies de acuerdo al contenido y concentración de los nutrimentos

Nutrimento	Especie	Valor	Homogeneidad
NT (%)	1	<b>0.05</b>	X
	2		X X
	3		X
	4		X
Ca <sup>+2</sup>	1	<b>0.03</b>	X X
	2		X
	3		X
	4		X X
Mg <sup>+2</sup>	1	0.32	X
	2		X
	3		X
	4		X
K <sup>+</sup>	1	0.16	X
	2		X
	3		X
	4		X
Na <sup>+</sup>	1	<b>0.04</b>	X
	2		X
	3		X
	4		X
Zn <sup>+2</sup>	1	<b>0.04</b>	X
	2		X X
	3		X
	4		X
Ni <sup>+2</sup>	1	0.06	X
	2		X
	3		X
	4		X
Fe <sup>+2</sup>	1	0.12	X
	2		X
	3		X
	4		X
Cu <sup>+2</sup>	1	<b>0.04</b>	X
	2		X X
	3		X
	4		X
Mn <sup>+2</sup>	1	<b>0.01</b>	X
	2		X
	3		X
	4		X
Cd <sup>+2</sup>	1	0.24	X
	2		X
	3		X
	4		X
Al <sup>+3</sup>	1	0.10	X
	2		X
	3		X
	4		X
Pb <sup>+2</sup>	1	0.28	X
	2		X
	3		X
	4		X
Se <sup>-2</sup>	1	0.25	X
	2		X
	3		X
	4		X
Cr <sup>+2</sup>	1	<b>0.05</b>	X
	2		X X
	3		X
	4		X X

*M. compressa* 1; *M. flavicentra* 2; *M. dixanthocentron* 3; *M. rekoii* 4.

### 7.3 Nutrimientos

En este apartado se muestran las tendencias en las concentraciones de cada nutriente en sistema radical y tallo a partir de las de suelo. Los nutrientes presentaron un comportamiento independiente, sin embargo, en algunos casos muy similares entre las especies en sus diferentes almacenes (suelo-sistema radical-tallo) mientras que en otros, presenta mayor especificidad. La atención en este apartado será para el sistema radical y tallo, el suelo aunque se presenta, se tiene como referencia para observar la absorción de nutrientes por el sistema radical, pues anteriormente ya se describieron las diferencias de concentración en éste almacén.

#### 7.3.1 Nutrientes a través del sistema suelo-planta y prueba de Kruskal Wallis

El sistema radical de las cuatro especies muestra un alza en los porcentajes de **Nt** con respecto al suelo con máximos y mínimos en diferentes diámetros para cada caso; el tallo con contenidos por debajo a los del sistema radical, sin embargo, no inferiores a los del suelo (excepto *M. rekoii*), *Mammillaria compressa* con el mayor porcentaje en éste órgano de 1.20 mientras que el resto no supera 0.91% (figura 15a). Entre los diferentes almacenes (suelo, sistema radical y tallo) existe una diferencia con un valor  $p$  de 0.00 para cada especie (cuadro 10).

*Mammillaria compressa* y *Mammillaria dixanthocentron* fueron las especies que presentaron mayor concentración de **Ca<sup>+2</sup>** en el sistema suelo-planta, en suelo la primer especie con un promedio de 12.00 g kg<sup>-1</sup> en tanto que *M. dixanthocentron* 17.41 g kg<sup>-1</sup>, en contraste suelos de *M. flavicentra* y *M. rekoii* 2.93 y 3.71 g kg<sup>-1</sup> respectivamente (Figura 15 b). Al equiparar la concentración de los suelos con las del sistema radical se observa una disminución en el total de especies, este descenso se tiene desde el diámetro fino (D1), con mayor acentuación en *M. compressa* y *M. dixanthocentron*; en las subsecuentes clases diametrales con poca variación de uno a otro manteniendo medias parecidas entre *M. compressa*-*M. dixanthocentron* y *M. flavicentra*-*M. rekoii*.

El orden de concentración en tallo de las especies es, *M. dioxanthocentron* > *M. compressa* > *M. rekoii* > *M. flavicentra* (14.86, 7.29, 3.97 y 2.48 g kg<sup>-1</sup> respectivamente). *M. compressa* es la única especie que muestra homogeneidad de concentración en los diferentes almacenes con un valor  $p$  de 0.49, *M. flavicentra* y *M. dioxanthocentron* con disimilitud en el sistema radical (valor  $p$  0.01 y 0.05 respectivamente) (cuadro 10).

Se puede observar que a partir de la concentración inicial de  $Mg^{+2}$  en el suelo (2.29, 2.34, 9.18 y 9.15 g kg<sup>-1</sup> en orden de aparición de la figura 15c) existe una disminución en el sistema radical de las cuatro especies y semejante entre estas (2.00 a 2.27 g kg<sup>-1</sup>) con poca variación en los diferentes diámetros excepto en dos especies (*M. rekoii* y *M. dioxanthocentron*, D1 y D2). En general las concentraciones son superiores en tallo que en suelo y sistema radical, lo anterior se observa en el cuadro 10 que muestra diferencia significativa con valores  $p$  de 0.02 y 0.01 de *M. compressa* y *M. flavicentra*, la omisión de disimilitud se encuentra en *M. dioxanthocentron* con un valor  $p$  de 0.39.

En el primer almacén (suelo) se presentan concentraciones de  $K^{+}$  parecidas entre especies (17.05, 22.54, 27.54 y 22.93 g kg<sup>-1</sup>) sin embargo, esta difiere en el sistema radical con un alza observable a partir del diámetro más fino (D1 de 0.0-0.5 mm), la oscilación es corta entre los diámetros restantes y más bien una gran similitud con énfasis en D5 (figura 15d). En tallo se tienen concentraciones de 49.29, 43.33, 38.51 y 44.62 g kg<sup>-1</sup> de *M. compressa*, *M. flavicentra*, *M. dioxanthocentron* y *M. rekoii* respectivamente, con lo anterior se advierte que superan al suelo mineral por lo que existe una diferencia entre estos almacenes con un valores  $p$  de 0.00, 0.002, 0.00, *M. rekoii* con diferencia de manera inferencial (cuadro 10).

En el caso de la concentración de  $Na^{+}$  encontrada en los suelos se observan diferencias entre estos, donde se establece *M. dioxanthocentron* y *M. rekoii* muy semejantes entre sí (3.41 y 3.55 g kg<sup>-1</sup>), sin embargo distan de las concentraciones encontradas en los de *M. compressa* y *M. flavicentra* (1.10 y 0.82 g kg<sup>-1</sup>) (cuadro 10). A continuación el intervalo de  $Na^{+}$  en el sistema radical para las cuatro especies se encuentra de 1.11 a 0.24 g kg<sup>-1</sup>, *Mammillaria rekoii* presentó los valores más bajos en sus diferentes diámetros (figura 15e). El tallo de las especies con una menor concentración en comparación a los dos primeros almacenes (suelo y sistema radical) son *M. compressa* ( $p$  de 0.00) y *M. flavicentra* ( $p$  de 0.02).

La media de la concentración de  $Zn^{+2}$  en el primer almacén (suelo) no rebasa 159.23  $mg\ kg^{-1}$  (*M. rekoï*) ni se encuentra por abajo de 83.52  $mg\ kg^{-1}$  (*M. compressa*), entre estos dos valores se ubican las dos especies restantes. La concentración muy similar en el sistema radical con concentraciones alrededor de las encontradas en suelo (cuadro 10). A lo largo de los diferentes diámetros se localizan alzas y bajas con mayor presencia en *M. flavicentra* y con menor variación en el sistema radical de *M. rekoï* (figura 15f). La concentración en tallo es muy similar entre especies (excepto *M. rekoï* 107.15  $mg\ kg^{-1}$ ), *M. compressa* 83.99, *M. flavicentra* 79.51, *M. dixanthoncentron* 86.53. *M. compressa* con un valor  $p$  de 0.87 y *M. dixanthoncentron* 0.13 de este modo la concentración a lo largo de sus diferentes almacenes no presentan disparidad, *M. flavicentra* con semejanza entre suelo y sistema radical más no así con tallo que arroja un valor  $p$  de 0.02 (cuadro 10).

Como se puede observar en la figura 16 a, las medias de la concentración de  $Ni^{+2}$  en los suelos son semejantes entre estos (intervalos de 0.28-0.34); el sistema radical con diferentes oscilaciones a lo largo de sus diámetros, *M. dixanthoncentron* en D1 con el valor más elevado en este órgano, posterior a éste se muestra disminución al presentarse un grosor mayor y unificación con el resto. No obstante, la media de la concentración de  $Ni^{+2}$  en éste órgano (sistema radical) no es disimilar con las de suelo en las cuatro especies. Finalmente, el órgano fotosintético muy similar en concentración entre especies, no obstante, al ser inferior al del sistema radical y suelo se obtuvieron valores  $p$  de 0.00, 0.02 y 0.01 de *M. compressa*, *M. flavicentra* y *M. dixanthoncentron* respectivamente (cuadro 10).

El  $Fe^{+2}$  presenta igualdad de concentración entre suelos donde se establecen las especies, (9.94 de *M. compressa*, 22.31 de *M. dixanthoncentron*) empero, con gran similitud ésta última con *M. rekoï*. El sistema radical de las cuatro especies presenta una disminución de éste nutrimento respecto al suelo; en los subsecuentes diámetros con diferentes fluctuaciones con mayor énfasis en D4 de las cuatro especies y en D5 de *M. flavicentra* (Figura 16 b). El tallo con concentraciones diferentes o superiores a las de suelo por lo que se presenta significancia estadística con valor  $p$  de 0.00 para *M. compressa*, 0.01 de *M. flavicentra* y *M. dixanthoncentron*; *M. rekoï* con disimilitud clara entre estos almacenes (cuadro 10).

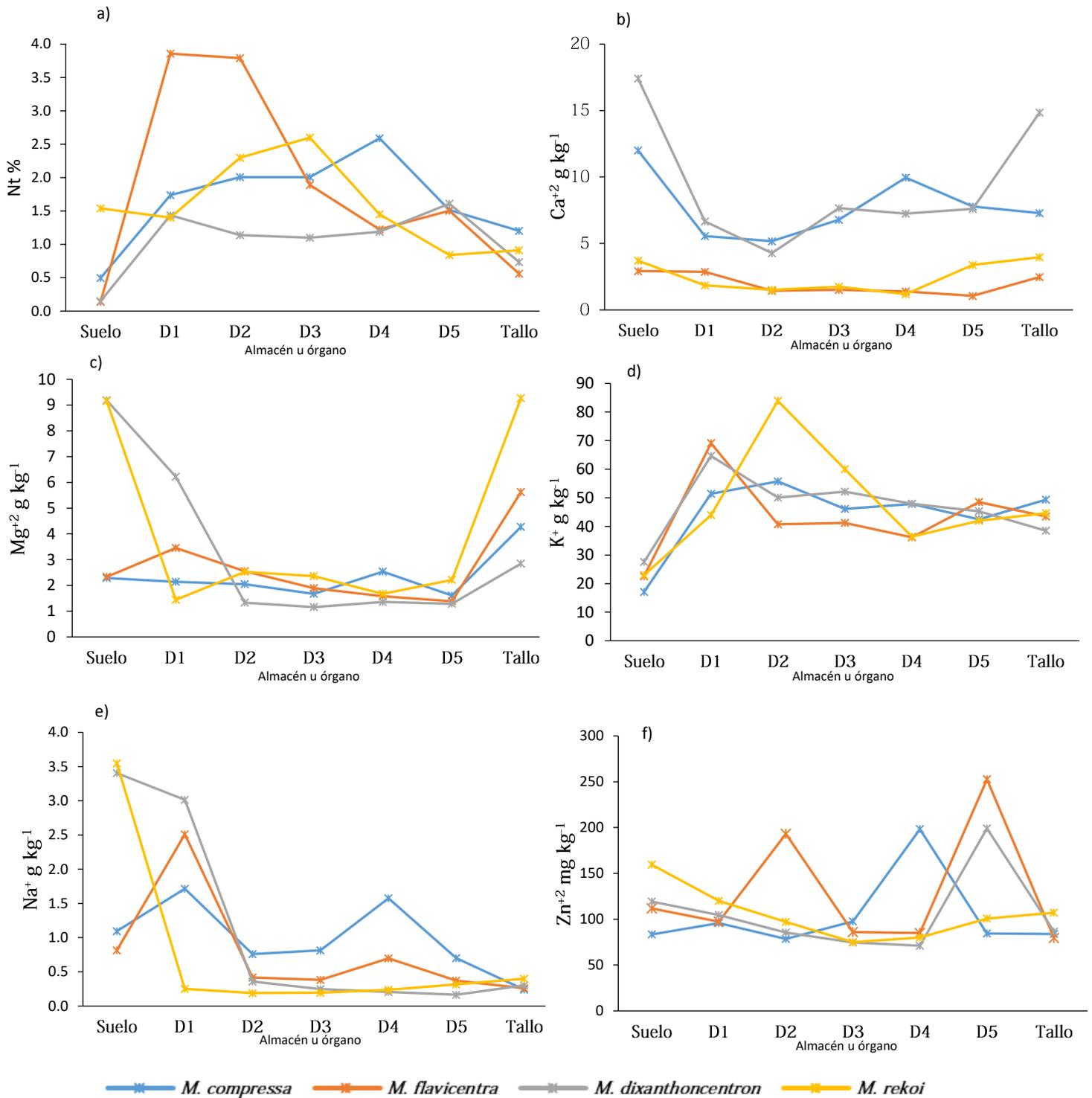


Figura 15 a-f. Comportamiento de los nutrientes Nt, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> y Zn<sup>2+</sup> en suelo, a lo largo del sistema radical y tallo de las cuatro especies del género *Mammillaria*

0.0-0.5 mm **D1**; 0.5-1mm **D2**; 1-2mm **D3**; 2-3 mm **D4**; >3mm **D5**.

**Nota:** Observese que la escala varía de un nutriente a otro.

Las cantidades de  $\text{Cu}^{+2}$  en el suelo presentaron un intervalo de 167.50 (*M. compressa*) a 267.50  $\text{mg kg}^{-1}$  (*M. rekoii*); en el sistema radical se observa una menor cantidad en las cuatro especies, esta disminución se inicia desde el diámetro más fino ( $D_1 = 0.0-0.5\text{mm}$ ), y es más notable en *M. rekoii*, también se observa que la concentración es muy semejante entre especies (figura 16c). El último órgano (tallo), continuó con depreciación en tres especies y compartiendo concentración (alrededor de 22  $\text{mg kg}^{-1}$ ); sin embargo, *M. compressa* difiere en este órgano y supera al sistema radical en concentración por lo que presenta una diferencia significativa entre estos almacenes con valor  $p$  de 0.00 (cuadro 10).

*Mammillaria compressa* tiene a lo largo del sistema radical, concentraciones entre 702.39 a 857.05  $\text{mg kg}^{-1}$ , en tallo 872.23  $\text{mg kg}^{-1}$  y el suelo que la soporta (842.50  $\text{mg kg}^{-1}$ ) una concentración similar de  $\text{Mn}^{+2}$ , en las tres especies restantes hay fluctuaciones con mayor énfasis pero con menor concentración, las tres especies restantes presentan más intervalos y con más intensidad, para ejemplificar obsérvese  $D_1$  y  $D_2$  (figura 16d). Finalmente el órgano con mayor concentración de los almacenes antes mencionados es el tallo (excepto *M. flavicentra*), empero este aumento sin arrojar una diferencia significativa en *M. compressa* (valor  $p$  0.49), *M. dioxanthocentron* (valor  $p$  0.19) y solo *M. flavicentra* diferente entre sus almacenes (valor  $p$  0.00) (cuadro 10).

Las concentraciones de  $\text{Cd}^{+2}$  en suelo con media de 4.34 en *M. compressa*, *M. flavicentra* 4.63, *M. dioxanthocentron* 3.63 y 2.00  $\text{mg kg}^{-1}$  de *M. rekoii*. Nuevamente *M. compressa* con la menor variación a lo largo de los diferentes almacenes, las tres especies restantes presentan fluctuaciones con mayor énfasis en  $D_2$  (figura 16e) empero, la media en la concentración en este órgano es muy similar en las cuatro especies (alrededor de 350  $\text{mg kg}^{-1}$ ) (cuadro 10). En tallo, esta similitud en concentración continua entre las especies, sin embargo, son inferiores al suelo y sistema radical. Entre los almacenes existe diferencia significativa en el total de especies (valor  $p$  0.02 *M. compressa*, 0.05 *M. flavicentra* y 0.05 *M. dioxanthocentron*, *M. rekoii* de manera inferencial) (cuadro 10).

El  $\text{Al}^{+3}$  muestra más oscilación en todo el sistema suelo-planta de las cuatro especies, en el suelo no supera 1262.50  $\text{mg kg}^{-1}$  y no se encuentra por debajo de 197.50  $\text{mg kg}^{-1}$ ; en tallo 1052.50 y 535.23  $\text{mg kg}^{-1}$ . La concentración entre el suelo y tallo se presenta de la siguiente manera, *M. compressa* 787.50 y 535.23  $\text{mg kg}^{-1}$  (sin diferencia significativa), *M. flavicentra* 197.50

y 641.25 mg kg<sup>-1</sup> (valor p 0.00), *M. dixanthocentron* 1262.50 y 1010.00 mg kg<sup>-1</sup> (valor p 0.73) y *M. rekoii* 545.00 y 1052.50 mg kg<sup>-1</sup> donde se aprecia de forma inferencial disimilitud. En la interfase entre estos almacenes, se observa que el sistema radical presenta una media superior a la del tallo (excepto *M. rekoii*), con fluctuaciones en los diferentes diámetros (figura 16e).

Ésta investigación arrojó que el **Pb**<sup>+2</sup> presenta tendencias bien definidas a lo largo del sistema suelo-planta. Como ejemplo, de las concentraciones del suelo donde se establece cada especie se presenta una disminución hacia el sistema radical con mayor certidumbre en D1 de *M. compressa*, con esta misma uniformidad, continua la baja de concentración del sistema radical a tallo, con mayor acentuación en *M. flavicentra*, *M. dixanthocentron* y *M. rekoii* (figura 16f). Por lo anterior se tienen diferencias significativas entre los almacenes, para *M. compressa* se reporta un valor p de 0.05 y 0.00 para *M. flavicentra* y *M. dixanthocentron*, estas dos últimas con diferencia entre todos los almacenes, mientras que en *M. compressa* el sistema radical se diferencia del suelo y tallo (cuadro 10).

En el sistema radical existe un aumento en la concentración de **Se**<sup>-2</sup> respecto al suelo donde se establecen tres especies (*M. compressa*, *M. flavicentra* y *M. rekoii*), *M. dixanthocentron* presentó el comportamiento inverso a lo antes descrito empero a estas disimilitudes no se encuentra una diferencia significativa entre estos almacenes (figura 16 g y cuadro 10). El órgano fotosintético con concentraciones inferiores a las del sistema radical en las cuatro especies pero superiores a las del suelo, sin embargo, estas diferencias de concentración no marcan una significancia en *M. compressa* (valor p 0.31) y *M. flavicentra* (valor p 0.29) en tanto que *M. dixanthocentron* reporta un valor p de 0.05, diferencia significativa del tallo respecto sistema radical y suelo (cuadro 10).

Las concentraciones de **Cr**<sup>+2</sup> en suelo y sistema radical de *M. compressa* y *M. flavicentra* presenta similitud entre estos almacenes, en tallo existe un alza (figura 16h) por consiguiente se presenta valor p de 0.00 y 0.02 respectivamente (cuadro 10); el resto de las especies con diferencias entre estos almacenes *M. dixanthocentron* con un valor p de 0.00 y en *M. rekoii* se puede observar esta disimilitud de forma inferencial con concentración en suelo de 2180.00 y en su sistema radical de 772.50 mg kg<sup>-1</sup>. El tallo de las cuatro especies con un incremento en concentración especialmente en *M. rekoii*.

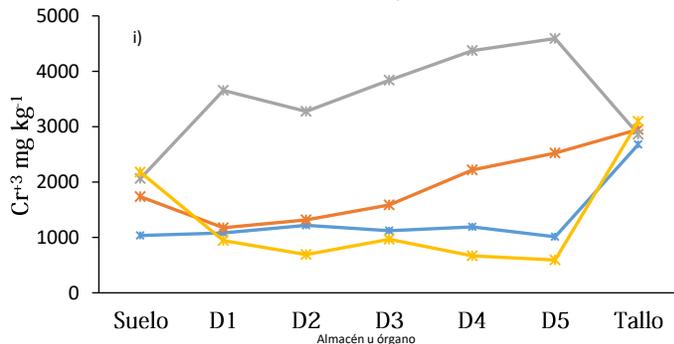
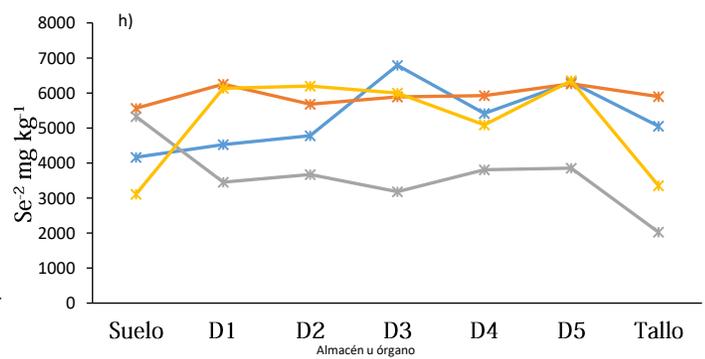
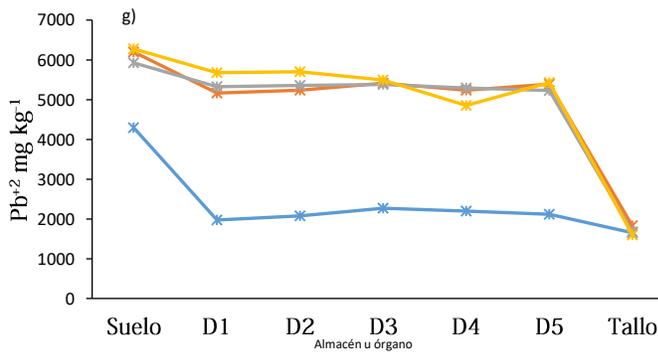
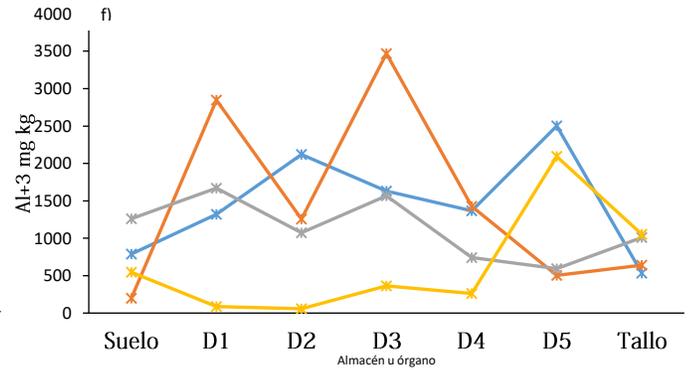
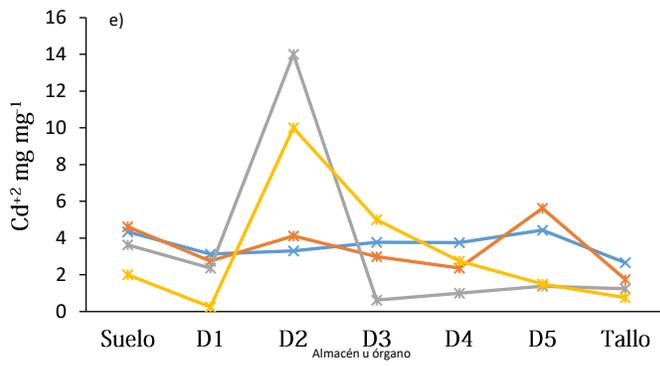
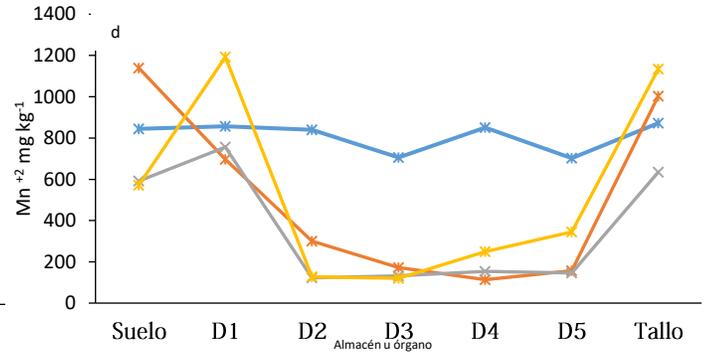
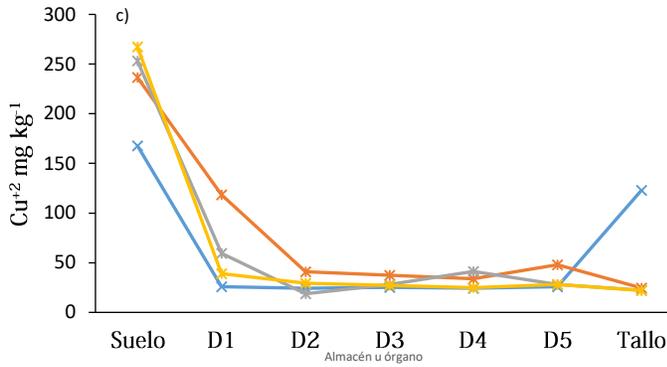
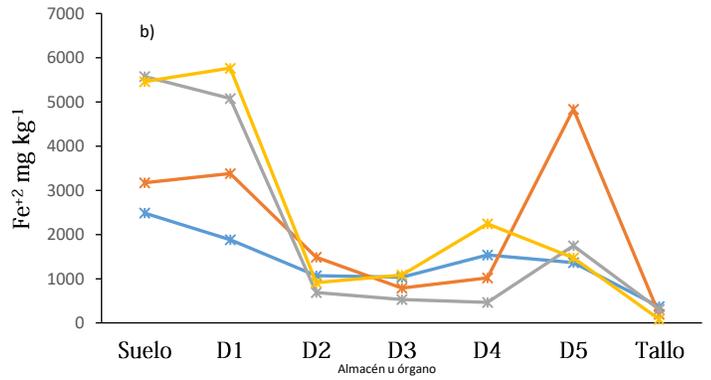
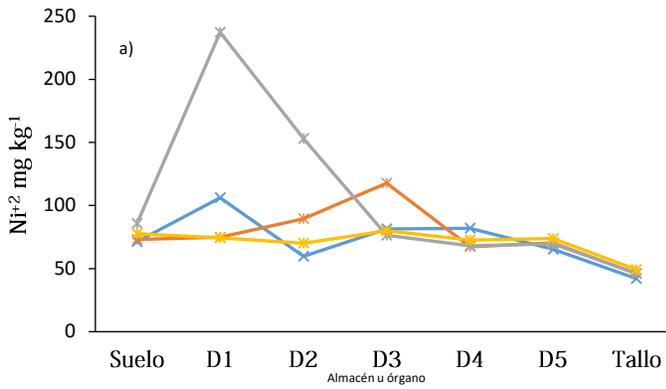


Figura 16 a-i. Comportamiento de los nutrientes en suelo  $Ni^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$ ,  $Cd^{+2}$ ,  $Al^{+3}$ ,  $Pb^{+2}$ ,  $Se^{-2}$  y  $Cr^{+3}$  a lo largo del sistema radical y tallo de las cuatro especies del género *Mammillaria* 0.0-0.5 mm D1; 0.5-1mm D2; 1-2mm D3; 2-3 mm D4; >3mm D5.

Nota: Observese que la escala varía de un nutriente a otro.

—\*— *M. compressa*      —\*— *M. flavicentra*  
 —\*— *M. dixonthocentron*      —\*— *M. rekoj*

Cuadro 10. Diferencias significativas de la concentración entre los diferentes almacenes de las diferentes especies del género *Mamillaria*.

Unidades	Especies			<i>M. compressa</i>			<i>M. flavicentra</i>			<i>M. dioxanthocentron</i>			Dato único
	Nutriente	Almacén	Valor p	Media	Homogeneidad	Valor p	Media	Homogeneidad	Valor p	Media	Homogeneidad		
%	Nt	Suelo		0.49	X		0.14	X		0.15	X	1.54	
		S.R	0.00	1.97	X	0.00	2.45	X	0.00	1.30	X	1.72	
		Tallo		1.20	X		0.56	X		0.74	X	0.91	
g kg <sup>-1</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Suelo		12.00	X		2.93	X		17.41	X	3.71	
		S.R	0.49	7.18	X	0.01	1.78	X	0.05	6.69	X	1.94	
		Tallo		7.29	X		2.48	X		14.86	X	3.97	
g kg <sup>-1</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Suelo		2.29	X		2.34	X		9.18	X	9.15	
		S.R	0.02	2.00	X	0.01	2.16	X	0.39	2.27	X	2.04	
		Tallo		4.26	X		5.68	X		2.84	X	9.26	
g kg <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup>	Suelo		17.05	X		22.54	X		27.54	X	22.93	
		S.R	0.00	48.72	X	0.02	47.14	X	0.00	52.01	X	53.25	
		Tallo		49.29	X		43.33	X		38.51	X	44.62	
g kg <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup>	Suelo		1.10	X		0.82	X		3.41	X	3.55	
		S.R	0.00	1.11	X	0.02	0.88	X	0.01	0.80	X	0.24	
		Tallo		0.24	X		0.26	X		0.30	X	0.40	
Mg kg <sup>-1</sup>	Zn <sup>+2</sup>	Suelo		83.52	X		111.75	X		119.21	X	159.23	
		S.R	0.87	110	X	0.02	142.5	X	0.13	105.00	X	95.00	
		Tallo		83.99	X		79.51	X		86.53	X	107.15	
Mg kg <sup>-1</sup>	Ni <sup>+2</sup>	Suelo		71.36	X		73.13	X		85.63	X	77.50	
		S.R	0.00	78.89	X	0.02	83.98	X	0.01	120.83	X	74.10	
		Tallo		42.11	X		46.00	X		46.25	X	49.25	
Mg kg <sup>-1</sup>	Fe <sup>+2</sup>	Suelo		2485	X		3170	X		5575	X	5462	
		S.R	0.00	1377	X	0.01	2301	X	0.01	1700	X	2294	
		Tallo		367.50	X		195.50	X		303.50	X	82.50	
Mg kg <sup>-1</sup>	Cu <sup>+2</sup>	Suelo		167.50	X		235.00	X		252.50	X	267.50	
		S.R	0.00	25.00	X	0.00	55.00	X	0.00	35.00	X	29.70	
		Tallo		123.00	X		24.63	X		22.50	X	22.00	
Mg kg <sup>-1</sup>	Mn <sup>+2</sup>	Suelo		842.50	X		1137.50	X		592.50	X	572.50	
		S.R	0.49	790.00	X	0.00	287.50	X	0.19	260.00	X	406.00	
		Tallo		870.00	X		1005.00	X		635.00	X	1135	
Mg kg <sup>-1</sup>	Cd <sup>+2</sup>	Suelo		4.34	X		4.63	X		3.63	X	2.00	
		S.R	0.02	3.67	X	0.05	3.57	X	0.05	3.87	X	3.90	
		Tallo		2.66	X		1.75	X		1.25	X	0.75	
Mg kg <sup>-1</sup>	Al <sup>+3</sup>	Suelo		787.50	X		197.50	X		1262.50	X	545.00	
		S.R	0.00	1787.00	X	0.00	1900	X	0.73	1130.00	X	572.50	
		Tallo		535.23	X		641.25	X		1010.00	X	1052.50	
Mg kg <sup>-1</sup>	Pb <sup>+2</sup>	Suelo		4292.50	X		6200.00	X		5925.00	X	6275.00	
		S.R	0.05	2125.00	X	0.00	5285.00	X	0.00	5316.00	X	5430.00	
		Tallo		1650.00	X		1825.00	X		1675.00	X	1600.00	
Mg kg <sup>-1</sup>	Se <sup>-2</sup>	Suelo		4165.23	X		5562.50	X		5325.00	X	3112.50	
		S.R	0.31	5562.50	X	0.29	6000.00	X	0.05	3590.00	X	5952.50	
		Tallo		5052.50	X		5890.00	X		2015.00	X	3350.00	
Mg kg <sup>-1</sup>	Cr <sup>+2</sup>	Suelo		1035.00	X		1735.00	X		2060.00	X	2180.00	
		S.R	0.00	1125.00	X	0.02	1760.00	X	0.00	4092.50	X	772.50	
		Tallo		2677.50	X		2947.50	X		2862.50	X	3095.00	

Sistema radical S.R

### 7.3.2 Análisis de Clúster

A continuación se muestra la figura 17, en ésta se observa claramente la formación de dos Clúster que resalta la máxima homogeneidad y la mayor diferencia entre las especies considerando todas las propiedades físicas y químicas del suelo así como los nutrimentos cuantificados en este.

Se advierte la cercanía de *Mammillaria compressa* y *Mammillaria flavicentra*, a continuación *Mammillaria dixanthoncentron* presenta parentesco con *Mammillaria reko*.

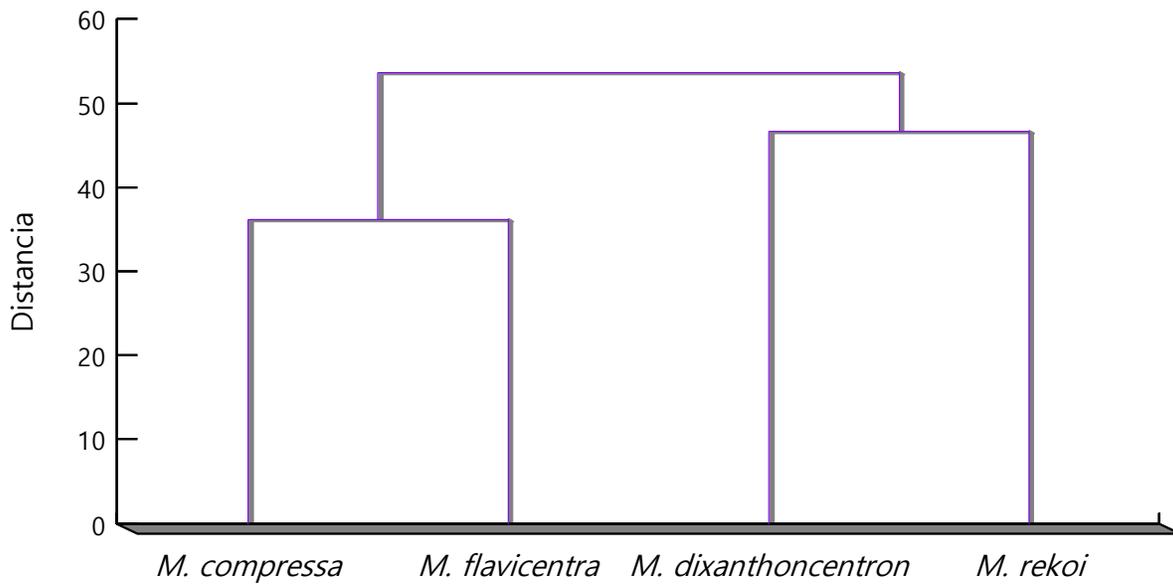


Figura 17. Análisis de Clúster que muestra la distancia entre especies respecto propiedades del suelo, contenido y concentración de nutrimentos.

## 7.4 Sistema radical

El sistema radical de las diferentes especies presentan formas y tamaños muy variables. Éstas características son dependientes de las diferentes condiciones ambientales en donde se establece cada especie además del código genético.

### 7.4.1 *Mammillaria compressa*

*Mammillaria compressa* presenta un sistema radical de origen embrionario, y por su forma se considera fibrosa. Se localiza en los primeros 3 a 7 cm de profundidad a lo largo del corte edáfico (figura 18).



Figura 18. Sistema radical de *Mammillaria compressa*.

El sistema radical presenta ramificación de segundo, tercero y cuarto orden, en tanto que, la raíz principal ha degenerado en los organismos adultos y únicamente está presente en etapas tempranas de desarrollo. Las raíces secundarias principalmente, son reemplazadas periódicamente por raíces nuevas que se desarrollan y adquieren dominancia explorando un diferente volumen de suelo (figura 19).

a)



b)



Figura 19. Origen del sistema radical de *Mammillaria compressa* (vista inversa); a: Ramificación de raíces secundarias, terciarias y cuaternarias; b: Degeneración de la raíz primaria

La longitud y diámetro de las raíces secundarias depende en gran medida del tamaño de la planta, éstas emergen del cuello del tallo (figura 20 b), normalmente son evidentes de 6 a 7 raíces que sobresalen en diámetro y se extienden de forma radial (figura 20 a).



Figura 20. Raíces de *Mammillaria compressa* organizadas de forma radial, ejemplar de dos años de edad aproximadamente; a) Cuello del tallo, sitio de inicio de ramificación del sistema radical.

En ejemplares identificados como genets (figura 20 y 23 b), el diámetro de las raíces de segundo orden, son similares a lo largo de su longitud, además, éstas se ramifican en tercero y cuarto orden inmediatamente, de la misma forma que las secundarias, desde la base del tallo. Caso contrario, en organismos con ramificación basítona, las raíces secundarias, que también se presentan de 6 a 7, tienen su máximo diámetro dentro del área que ocupa el tallo fotosintético, al alejarse de ésta zona, se observa considerablemente un adelgazamiento, además de ser en éstos sitios (menor diámetro), donde se lleva a cabo la ramificación que originan las raíces terciarias y cuaternarias creando una red compleja y abundante (figura 21).



Figura 21. Raíz secundaria de *Mammillaria compressa* (una de las 6) con diámetro superior en la parte basal y sin presentar ramificación en los primeros centímetros.

Tanto las raíces secundarias, terciarias y cuaternarias se ramifican nuevamente en la parte más alejada a la zona basal originando una urdimbre conformada por seis a siete raíces ordenadas radialmente que se ramifican siguiendo el mismo patrón morfológico anteriormente descrito para las raíces que emergen del cuello de la raíz (figura 22).



Figura 22. Urdimbre en el extremo de cada raíz que conforman el sistema radical de *Mammillaria compressa*.

Cabe señalar, que los ramets que conforman una colonia, desarrollan su propio sistema radical adventicio que se extiende de manera vertical, con un número variable de raíces (figura 23). Por otro lado, el tallo presenta una elongación con fototropismo negativo que resulta en penetración en el suelo, de éste modo, la colonia y particularmente el ramet adquiere recursos del suelo a través de su sistema radical (individual) y del sistema radical de la colonia en virtud que, el ramet permanece unido a ésta.



Figura 23. Comparación en la forma de ramificación del sistema radical de un ramets versus genet de *Mammillaria compressa*.

En conjunto, el sistema radical de *Mammillaria compressa* comprende una extensa red que puede llegar a explorar un área superior de hasta tres veces el área ocupada por la colonia (figura 24).

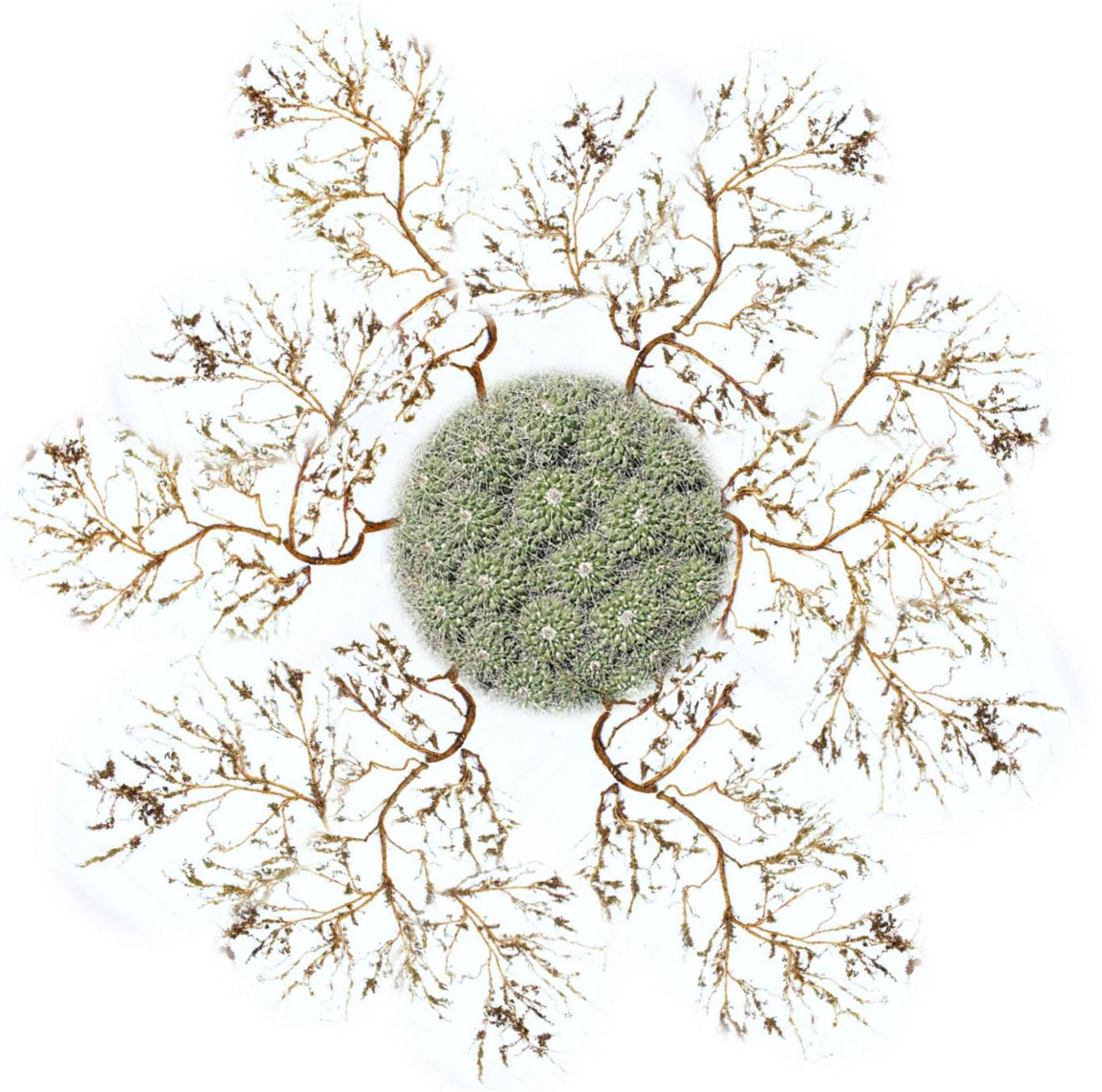


Figura 24. Modelos del sistema radical de *Mammillaria compressa*

#### 7.4.2 *Mammillaria flavicentra*

*Mammillaria flavicentra* presenta sistema radical de origen embrionario, por su forma se considera fibrosa, se localiza en los primeros 4 a 7 cm de profundidad a lo largo del perfil edáfico, su ramificación es de forma horizontal (figura 25).



Figura 25. Sistema radical fibroso de *Mammillaria flavicentra*



Figura 26. Origen del sistema radical fibroso de *Mammillaria flavicentra*.

La longitud del sistema radical puede alcanzar los 60 a 70 cm, no obstante, éste dato dependerá de la edad de la planta. En la figura 25 se muestra un ejemplar con raíz completa que alcanza los 45 cm de longitud.

La arquitectura de este órgano para *Mammillaria flavicentra* versus *Mammillaria compressa*, *Mammillaria dixanthocentron* y *Mammillaria rekoii*, es la de menor densidad, no obstante, se considera que se pierde gran cantidad del sistema radical fino durante la extracción de la planta (figura 25).

La raíz embrionaria se atrofia y es reemplazada por numerosas raíces dando origen al sistema radical de la planta madura, misma que comienzan su ramificación inmediatamente después del cuello del tallo, éstas son raíces de segundo orden, con diámetros diversos donde sobresalen las de mayor grosor, sin embargo, en esta misma zona se observan raicillas con gran abundancia (figura 26).



Figura 27. Ramificación de las raíces de segundo orden de *Mammillaria flavicentra*

Las raíces secundarias se ramifican en terciarias y cuaternarias hasta encontrar otras más finas que presentan gran cantidad de materia orgánica fresca adherida. Las raíces más jóvenes presentan una coloración con tonos más claros a aquellas más longevas (figura 27).

Cabe señalar que el sistema radical puede adoptar una arquitectura diferente, lo cual depende de las condiciones de establecimiento, por tanto, cuando se encuentra entre rocas éste puede dirigirse con dirección vertical más que en lo horizontal.

### 7.4.3 *Mammillaria dixanthocentron*

*Mammillaria dixanthocentron* presenta sistema radical de origen embrionario, por su forma se considera fibrosa, se localiza en los primeros 4 a 7 cm de profundidad a lo largo del perfil edáfico, su ramificación es de forma horizontal (figura 28).



Figura 28. Sistema radical fibroso de *Mammillaria dixanthocentron* .

En la zona inmediatamente inferior al cuello del tallo, un gran número de raíces (no se presenta una raíz principal) se desarrollan extendiéndose lateralmente en forma radial logrando longitudes de hasta 30 cm, este parámetro varía con la edad de la planta. El sistema radical de ésta especie se ramifica en raíces secundarias, terciarias y cuaternarias, sin embargo, el número de ramificaciones no es muy abundante (figura 29 y 30).



Figura 29. Sistema radical de *Mammillaria dixanthoncentron* y su desarrollo horizontal.



Figura 30. Origen de la ramificación de *Mammillaria dixanthoncentron*

### 7.4.3 *Mammillaria reko*

*Mammillaria reko* presenta un sistema radical de origen embrionario, por su forma se considera raíz fibrosa, se localiza en los primeros 10 cm de profundidad a lo largo del perfil edáfico, su ramificación se orienta verticalmente (figura 31).



Figura 31. Sistema radical fibroso de *Mammillaria reko*.

La arquitectura del sistema radical se inicia prácticamente desde el cuello del tallo; no se presenta raíz principal y en su lugar emergen un número de raíces que dependen de la edad de la planta, éstas con un diámetro similar que adelgaza conforme se aleja del origen (figura 32). En éste sistema radical también se observan raíces secundarias, terciarias y cuaternarias, sin embargo, la densidad de raíces secundarias se mantiene constante en la primer mitad de la longitud total del sistema radical, el número de raíces terciarias y cuaternarias es el más alto, por lo tanto un abundante sistema radical fino, es el responsable de proveer a la planta los recursos de agua y nutrientes en el hábitat de roca en que ésta especie se le localiza más frecuentemente (figura 32).



Figura 32. Ramificación del sistema radical de *Mammillaria rekoii* a más de 10 cm de profundidad.

Cuando *Mammillaria reko* se desarrolla sobre material suelto la distribución del sistema radical va desde la superficie del suelo mineral hasta los 20 cm, sin embargo, esto se ve influenciado por la edad de la planta. Cabe señalar que cuando en la superficie del suelo mineral se encuentra una capa de mantillo parte del sistema radical fino invade a este horizonte (figura 33).



Figura 33. Ramificación del sistema radical de *Mammillaria reko*, se observan raíces secundarias, terciarias y cuaternarias

## VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 8.1 Tipos de vegetación y perfiles edáficos

*Mammillaria compressa* presentó amplia distribución, se localizó en los estados de Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí, sitios geográficos donde Pilbeam (1999) también refiere a ésta especie, está presente en diferentes tipos de vegetación, desde matorrales hasta bosques espinosos y tropicales caducifolios (Bravo-Hollis 1978), con variación altitudinal que va de 907 a los 2065 m, datos que coinciden con los intervalos mencionados por Rzedowski (2006) para éstos tipos de vegetación.

La diversidad de tipos de vegetación donde se le encuentra a *Mammillaria compressa* enriquece concomitantemente otras condiciones como lo es el clima de árido a semiárido o de calido a templado, con diferente precipitación de 350 a 800 mm (Kodandapani *et al.* 2008 y Rzedowski 2006), con todo tipo de condiciones topográficas (Rzedowski 2006), mismas que se muestran en la presente investigación al encontrarlas desde planicies hasta 40% de pendiente, el tipo de suelo presente en cada tipo de vegetación puede ser aluvial profundo en los bosques espinosos, a someros y pedregosos de los matorrales principalmente como lo mencionan Fernández *et al.* (1998) y Villaseñor (2005).

La gama de condiciones ambientales donde se establece *Mammillaria compressa* se ha observado en otros grupos de especies con distribución no restringida (López *et al.* 1997, Gelviz-Gelvez y Pavón 2013), como el señalado por García-Mendoza (2002) para ejemplares del género *Agave*, al encontrarlos desde bosques templados, zonas áridas y semiáridas hasta selvas tropicales, relacionado a su vez, a una diversidad de condiciones climáticas, fisiográficas y edáficas.

Los beneficios que adquiere *Mammillaria compressa* ante la gran diversidad de ambientes colonizados, radica en tener poder competitivo con otras especies encontradas en los diferentes tipos de vegetación y, a la vez, ser capaz de interactuar con ésta y obtener beneficios para su establecimiento (nodrizaje). Así mismo, se expone a diferentes tipos de polinizadores y dispersores para garantizar la colonización de los diferentes hábitats, además, *M. compressa* al presentar amplia tolerancia a diferentes intervalos de factores bióticos y

abióticos, tiene mayor ventaja sobre las que tienen especificidad del hábitat y que ante cualquier cambio climático, como los que se viven en la actualidad, ésta tenga más estrategias y poder de adaptación para continuar con su reclutamiento y establecimiento sin verse comprometida.

De la diversidad de tipos de vegetación donde se encontró a *Mammillaria compressa*, los bosques espinosos presentan una connotación directa entre el tamaño de las colonias (ramets) y la profundidad de los suelos de hasta 90 cm y poco pedregosos (perfil 2 ACR, perfil 3 A1A2A3C y perfil 4 A1A2A3C, Regosol calcárico, Phaeozem vértico y Phaeozem calcárico respectivamente), es decir, existe una extensa ramificación de forma basítona, lo que incrementa la biomasa y se originan ejemplares con diámetros de hasta 1.5 m o más en algunos casos; en los matorrales donde los suelos son someros y muy pedregosos, las colonias no alcanzan más haya de 50 cm de diámetro.

Se atribuye que el buen establecimiento en los bosques espinosos se debe a la mayor profundidad y menor pedregosidad, factores que son aprovechados por la planta para extender su sistema radical y obtener mayor área de superficie, mejor anclaje y verse traducido en ejemplares prominentes, así como la capacidad que tienen éstos suelos de retener mayor humedad y nutrimentos.

Por otro lado, la presencia de una cantidad importante de leguminosas que aportan nitrógeno (Mendez *et al.* 2006) también es causa de un exitoso establecimiento, además que, ésta y el resto de la vegetación del entorno funge como nodriza, relación que fue referida en 1999 por Leirana-Alcocer y más adelante en el 2011 por Ferrer y colaboradores en *Mammillaria gaumeri*. Éstos autores encontraron que las semillas sólo germinaron en sitios sombreados, además de presentar la muerte rápidamente al ser expuestas al sol en estadios tempranos de desarrollo, por lo que el nodrizaje por parte de árboles de talla baja, arbustos y otras plantas suculentas (Armas y Pugnaire 2005; Barchuk y Díaz 2005, Larrea-Alcázar y Soriano 2008), favorecen el establecimiento creando microambientes bajo el dosel, no obstante, también puede representar un costo para la plántula en términos de radiación fotosintética activa.

Es imperante mencionar que, además de la asociación con la vegetación, la presencia o ausencia de las especies, está influenciada por el conjunto de las propiedades físicas y químicas del suelo (relación suelo-planta) (Abd El-Ghani *et al.* 2014), de este modo, una de

las propiedades que cobra relevancia es la pedregosidad, misma que toma el papel de nodriza cuando la vegetación es menor o limita su desarrollo por competencia de cualquier recurso del ambiente, de ésta forma, las rocas pueden proporcionar un ambiente fresco y húmedo sin reducir la luz solar (Peters *et al.* 2008), condición donde la especie se establece con éxito (leptosoles).

*Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria reko* en virtud de ser especies endémicas, presentan distribución restringida, sólo fueron recolectadas en el estado de Oaxaca en en bosque de *Quercus* en ecotonia matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio y bosque de *Quercus* respectivamente (Pilbeam 1999, Reyes *et al.* 2004), limitando las condiciones de establecimiento y generando alta especificidad del hábitat, lo cual, no es inusitado y se ha observado en otras especies del género como *Mammillaria gaumeri*, *Mammillaria pectinifera* y *Mammillaria humboldtii* señalado por Ferrer *et al.* (2011) Peters *et al.* (2014) y Martínez-Ramos *et al.* (2016) para cada caso.

El bosque de *Quercus* en ecotonia con el matorral xerófilo toma relevancia al ser un sitio que aporta características de ambos tipos de vegetación creando condiciones específicas además que, Encina y Villareal (2002) mencionan que en éste tipo de transiciones, es donde se pueden albergar endemismos como en éste caso *Mammillaria flavicentra*, así como ser sitios capaces de encontrar nuevas especies (Gual-Díaz y Moreno-Gutiérrez 2009). Se encuentra a una altitud superior de los 2300 m, dato considerado dentro de los intervalos reportados por Rzedowski (2006), con una precipitación de 500 a 650 mm.

El bosque tropical caducifolio donde se establece *Mammillaria dixanthoncentron* se encuentra a una altitud entre 857 y 880 m, sin embargo, éste bosque no es único de ésta altitud y según la descripción de Rzedowski (2006) se le puede encontrar desde los 0 a los 1900 m, con lo que se puede discernir la especificidad que requiere *M. dixanthoncentron* pues aun encontrándose bosques tropicales caducifolios generalmente por toda la vertiente pacífica, es a una altitud alrededor de los 800 m donde se establece y que por tanto condiciona características específicas como lo es la temperatura y la precipitación principalmente la cual oscila en estos sitios entre 20 a 31°C y 600 a 800 mm respectivamente y que a su vez, tiene influencia sobre las propiedades del suelo.

Los requerimientos edáficos del bosque tropical caducifolio, se caracterizan por suelos someros y desarrollo incipiente principalmente, además de ser pedregosos en laderas bajas y lomerios, con presencia de sitios sumamente accidentados (Rzedowski 2006, Pineda-García *et al.* 2007) situación que se reflejó al observar en campo que la presencia de *M. dioxanthoncentron* preferentemente se halla en grandes peñascos con pendientes pronunciadas y/o suelos someros altamente pedregosos.

Ixtlán de Juárez, Oaxaca, es un sitio importante que fue referido por Pilbeam (1999) donde se le encuentra principalmente a *Mammillaria rekoii*, mismo, donde fue localizada en la presente investigación. Es aquí donde la vegetación corresponde a bosque de *Quercus*, a una altitud de 2008 m, que coincide con lo dicho por Rzedowski (2006), al mencionar que se le puede encontrar con mayor frecuencia entre los 1200 y 2800 m, mientras que los requerimientos edáficos para contener a la vegetación de éste bosque son suelos profundos de terrenos aluviales planos según Rzedowski (2006), no obstante, también hace referencia que éstas características son actualmente ocupados por la agricultura, lo cual puede explicar porque la abundancia de *M. rekoii* se encuentra en suelos someros a grandes pendientes, además, también se ubica en éstos sitios abruptos como estrategia pues el bosque de *Quercus* puede contener ejemplares que van de los 2 a los 30 m de altura, lo que puede representar una gran competencia sobre todo, por el recurso luz.

*Mammillaria rekoii*, no es la única con la estrategia de establecerse donde la radiación solar no sea una limitante, las cuatro especies tienen la pericia de buscar éste recurso, razón por la cual, preferentemente se les encuentra en grandes pendientes donde la competencia por la luz solar es más baja o en sitios donde la densidad de la vegetación es menor y exista la penetración de la luz, será entonces, sitio donde se les encontrará aunque con menor repetitividad.

Contrario a *Mammillaria compressa* que forma grandes colonias, *Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dioxanthoncentron* y *Mammillaria rekoii* no presentan esta característica prominentemente, en ocasiones con ramificación de forma basítona (ramets) pero con más frecuencia solitarias (genets), como lo refieren Pilbeam (1999) y Reyes *et al.* (2004). Se atribuye ésta característica por presentar mayor especificidad del hábitat las tres especies, su estrategia es ramificarse lo menos posible, para que cualquier variación, sobre todo a un nivel de microambiente, no se vean afectados ejemplares con dimensiones superiores y sea sólo un

individuo el que perezca, además, presentan menor tolerancia a los cambios ante las condiciones edáficas en cada caso.

A diferencia de *Mammillaria compressa* que su mejor desarrollo es en suelos profundos y poco pedregosos, *Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria reko* presentan predilección por establecerse entre fisuras de rocas o suelos someros y muy pedregosos, características de los leptosoles líticos, lo cual no es infrecuente y ha sido reportado por diversos autores (Parker 1987, Parker 1989, Flores y Jurado 2003, Valverde *et al* 2004). En un ejemplo más detallado, un estudio realizado por Álvarez y colaboradores (2004) hacen alusión que, en los estados de Querétaro e Hidalgo, México *Strombocactus disciformis* y *Turbinicarpus pseudomacrolele*, crecen preeminentemente en grietas de rocas y en el caso de *Strombocactus disciformis* únicamente en laderas con pendientes pronunciadas, de la misma forma López *et al.* (2009) reportan que *Mammillaria fraileana* presentan dicha preferencia y, no sólo en cactáceas se reporta, Fujita y Mizuno (2015) observaron este patrón en plantas leñosas de África.

La pedregosidad crea las condiciones más favorables de supervivencia, una mejora en la retención de humedad, sobre todo, después de un evento de lluvia al conservarse durante un periodo más prolongado que en un suelo desprovisto de rocas (Nobel *et al.* 1992; Nobel y Zutta 2005), la temperatura es menor cerca de éstas que a una distancia de 50 cm (Nobel 1988, Nobel *et al.* 1992), existe disminución de evotranspiración y como resultado, mayor longevidad y crecimiento para las especies (Peters *et al.* 2008), incluso Nobel y Zutta (2005) mencionan que debajo de ésta pedregosidad algunos cactus desarrollan un sistema radical con mayor vigor, sin dejar de mencionar que es el sitio de menor herbivoría, posibles fallas mecánicas en las semillas (Niering *et al.* 1963, Valiente-Banuet y Escurra 1991), así como un incremento en el reservorio de éstas (Valdez-Manzanares 2009).

Un aspecto que se observa en todas las localidades para las cuatro especies, lo cual no selectivo ni del estado, el tipo de vegetación o tipo de suelo, es enfrentar factores antropogénicos como el cambio de uso de suelo, que en su mayoría corresponde a forestal con pastoreo y/o agrícola y pecuario impactando drásticamente en la reducción en las poblaciones naturales de mammillarias, en conjunto con el saqueo que éstas especies viven por parte de los coleccionistas y personas nativas con el fin de extraer los frutos, o sólo por

las personas que son aficionadas a la belleza de sus flores, apertura de nuevos caminos entre otros factores (Ureta y Martorell 2001; Martorell y Peters 2005; Valverde *et al.* 2009; Ferrer *et al.* 2011; Martínez-Ramos 2016), fenómenos que fueron observados en las diferentes localidades esencialmente en La Loma, Hidalgo, sitio donde crece *M. compressa* (perfil 2) y que a lo largo del desarrollo de ésta investigación se observó una disminución significativa de sus poblaciones. Las causas que explican la gran afectación hacia estas especies ante ésta problemática es presentar lento crecimiento, ciclos largos de vida y bajo reclutamiento de nuevos individuos que supone una baja capacidad de recuperación después de un evento de perturbación (Ureta y Martorell 2001).

El hábitat ocupado por las especies del género *Mammillaria* son particulares para cada caso, y cada una de ellas emplea estrategias diferentes para su exitoso establecimiento. *Mammillaria compressa* presentó amplia tolerancia ante las condiciones ambientales, mientras que, las tres especies restantes presentan especificidad, la pedregosidad juega un papel importante en la función de nodricismo para las cuatro especies, mientras que, la profundidad de los suelos de los bosques espinosos donde se encuentra *M. compressa* tiene íntima relación y gran importancia en el incremento de la ramificación y biomasa, finalmente el Leptosol lítico es el ambiente edáfico preferente donde se establecen las cuatro especies.

## 8.2 Clasificación de suelo

La identificación de los suelos en los que habitan las cuatro especies del género *Mammillaria* estudiadas en esta investigación, se realizó con base en la Base Referencial del Recurso Suelo versión 2007 (WRB por sus siglas en inglés).

En el presente estudio la profundidad de los suelos en los sitios 1, 2, 4, 6, 8 y del 10 a la 16 no superaron los 25 cm, establecidos sobre roca continua, con pedregosidad que alcanzó 90%, en pendientes de 15%, con perfiles ACR, el sistema radical no rebasa los 10 cm de profundidad y MO de hasta 33% (suelo orgánico) y 14.30% (suelo mineral) características que concuerdan con la descripción de la WRB (2007) para leptosoles en 12 de 16 localidades; no obstante, se hace la acotación que de éstas localidades *M. flavicentra*, *M. dixanthocentron* y *M. rekoii* se establecen y desarrollan únicamente en leptosoles específicamente lítico. El resto

de sitios donde se establece *M. compressa* 3, 5, 7 y 9 (perfil 2, 3, 4 y 6) presentaron características que cumplen la cita de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo versión 2007, para Regosol calcárico (pedregosidad máxima de 10%, suelo ligeramente cementado por  $\text{CaCO}_3$ ), esta misma especie crece en suelos Phaeozem vértico (profundidad de más de 60 cm, en una pendiente de 40%, con contenido de arcilla de hasta 56%, con presencia de concreciones de  $\text{CaCO}_3$  y caras de deslizamiento bien definidas, así mismo en suelos Phaeozem calcárico (color grisáceo oscuro-rosado a café-oscuro, profundidad de 90 cm en una pendiente de 7%, con presencia de concreciones de  $\text{CaCO}_3$ , con disminución mínima de porosidad en el horizonte inmediatamente por arriba y por abajo), finalmente se le localizó en Kastanosems háplico (pendiente de 5%, color café grisáceo-oscuro, pedregosidad de más de 60%, con 8% de MO).

Se tiene por tanto, que del total de suelos para las cuatro especies los leptosoles, específicamente Leptosol lítico es el de mayor presencia para las cuatro especies.

### 8.3 Caracterización del suelo de la zona radical

En este estudio se definió que el suelo de la zona radical comprende el espesor de 0-10 ( $P_1$ ) y 10-20 cm ( $P_2$ ), sin embargo, sólo *Mammillaria compressa* presentó ambas profundidades al establecerse en suelos con una profundidad mayor a 20 cm, por lo tanto, en lo subsecuente de esta discusión se tomarán los datos de  $P_1$  para igualar condiciones con el resto de las especies que cuentan exclusivamente con la primer profundidad. No obstante y con mayor relevancia y no caer en arbitrariedad, la prueba de Kruskal-Wallis, evidenció que, no existe disimilitud entre profundidades en cuanto a sus propiedades físicas y químicas, excepto en MO, donde  $P_1$  presenta mayor contenido, tendencia que se presentan en otras investigaciones como las de Castruita *et al.* (2000) y Bautista-Zuñiga *et al.* (2002) existiendo disminución conforme incrementa la profundidad, ocasionada principalmente, por la baja precipitación que evita disminución en la actividad biológica, la translocación de humus concomitantemente baja en los contenidos de materia orgánica.

Cabe señalar que, aunque la prueba estadística no arroje indicios de diferencias significativas en el resto de las propiedades del suelo, se considera que pueden deberse al momento de la toma de muestra y que las condiciones se tornaran homogéneas, no obstante,

principalmente un cambio de humedad (precipitación, sequía prolongada), puede cambiar las condiciones físicas y químicas del suelo e influir en el sistema radical y hacia el resto de la planta.

Como ya se abordó anteriormente, *Mammillaria compressa* muestra tolerancia para establecerse en diferentes tipos de vegetación y tipos de suelo, lo que se traduce a amplios rangos en las propiedades físicas y químicas del suelo y se observa especialmente en pedregosidad, DA, DR, contenido de arcilla, pH y MO. Esto se explica al comprender que, la especie al presentar lento crecimiento, la demanda de nutrimentos es mínima, se puede entonces, establecer en diferentes suelos que le proveen de lo mínimo necesario sin ser afectada en su establecimiento por contenidos superiores a los requeridos de las propiedades del suelo como contenidos de arcilla, pH y MO, el resultado de esta gama de condiciones se relaciona con las formas en que se puede encontrar a *Mammillaria compressa*, desde un crecimiento solitario hasta grandes colonias, todo va en función de lo que le provee el suelo para satisfacer sus requerimientos y, cuando la especie se ve ante condiciones más favorables lo explota al presentar un incremento de biomasa y reclutamiento de nuevos individuos.

En cuanto a los amplios rangos de densidad aparente y densidad real, primeramente se debe a los mismos amplios rangos de contenidos de arcilla y de materia orgánica, los cuales, se relacionan con éstas propiedades. Por otro lado, *Mammillaria compressa* está adaptada, al ser especie de las zonas áridas y semiáridas, a presentar mayor resistencia mecánica para la elongación del sistema radical (Siegel-Issem 2002), por tanto, no existen complicaciones para ella si aumenta este parámetro. Cabe señalar que factores como, el periodo de toma de muestras, época seca o de lluvias, puede afectar el grado de contracción o de expansión de la masa del suelo (Alvarádo y Forsythe 2005).

El suelo donde se establece *Mammillaria flavicentra* presenta los porcentajes más bajos de pedregosidad, sin embargo, con observaciones de campo se le encuentra con mayor densidad en las paredes donde se dificulta el muestreo (Leptosol lítico), en tanto que, en las partes planas se ven beneficiadas por los ricos contenidos de materia orgánica del horizonte O, que se origina por el desfronde del bosque de *Quercus*, lo que infiere en la mejora de otras propiedades físicas como: espacio poroso considerados excelente por Kaurichev (1984) y superiores a los datos obtenidos del resto de suelos de las otras especies, que a su vez, favorece

como lo mencionan Sánchez *et al.* (2005) y Simón *et al.* (2013) la buena aireación y es en éstos poros donde se retiene el agua para el sistema radical que no supera los 10 cm, así mismo, existe una disminución de la densidad aparente (Núñez *et al.* 2011) que es menor respecto al resto de suelos y es benéfico para la elongación del sistema radical al presentar menor resistencia mecánica (Siegel-Issem 2002), un pH menor versus el resto por la presencia de mayor actividad de micro organismos al contener excelentes porcentajes de MO en conjunto con la precipitación del bosque de *Quercus* superior a la de los matorrales.

Cabe resaltar con gran importancia, que el muestreo se realizó donde la accesibilidad a la planta existió, más no se puede considerar como el sitio preferentemente donde se encuentra *M. flavicentra* con abundancia, éste es, como ya se mencionó, pendientes superiores, donde se considera que el cúmulo de hojarasca disminuye considerablemente hasta no presentar un horizonte O, sin embargo, los contenidos de MO siguen altos al existir entre las fisuras un cúmulo de ésta lo que las propiedades antes mencionadas continúan con el beneficio ya descrito.

El ambiente edáfico de *Mammillaria dixanthocentron* es derivado de materiales gipsofilos; como es sabido el yeso es uno de los materiales geológicos más ligeros con alta capacidad de hidratación, tan es así, que su estructura química es  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , la presencia de éste material hereda de antemano al suelo DA baja, elevada porosidad (Kaurichev 1984), alta retención de humedad y excelente drenaje al suelo, condiciones que favorecen a esta especie en su establecimiento y desarrollo, sin embargo, se encontró que éstos suelos se caracterizan por un bajo contenido de MO humificada, la más alta CE respecto al resto de los suelos estudiados donde se establecen las tres especies así, como altos contenidos de pedregosidad, condiciones que indudablemente, también le favorecen al limitar el establecimiento de especies que podrían competir con ella.

El hábitat en el que ecológicamente se encuentra *Mammillaria Rekoii*, tiene un clima con precipitaciones superiores a 800 mm cuya vegetación dominante son bosques de encino con presencia de pino, es decir, son condiciones que favorecen el establecimiento y desarrollo de estrato arboreo, arbustivo y herbáceo bien desarrollados y representan por ende alta competencia para especies como *M. rekoii* cuya altura no es superior a lo 15 cm, sin embargo,

ésta especie se establece en afloramientos rocosos caracterizados prácticamente por carecer de material suelto o éste es muy delgado no mayor a 10 cm, condiciones que le favorecen respecto a otros componentes de la vegetación. El escaso material suelto en el cual frecuentemente se ancla *M. rekoii* se caracteriza por alta pedregosidad y retención de humedad y, a pesar de que tiene los más altos contenidos de arcilla y ricos en materia orgánica formando el complejo de cambio y mejorando la estructura del suelo (Sánchez *et al.* 2005, Simón *et al.* 2013).

La presencia o ausencia de una población o especie se debe al conjunto de factores del ambiente junto con la interacción entre el complejo de adaptaciones desarrolladas por los organismos (formación de colonias en el caso de *M. compressa*, ruta fotosintética, interacción con otros individuos del entorno, lento crecimiento, establecimiento entre fisuras entre otras), de este modo, para comprender o explicar porque las especies en estudio preferentemente se encuentran en leptosoles es necesario realizar una integración de las propiedades que brindan como resultado el hábitat propicio para éstas en éstos suelos, particularmente al proveerles de los recursos que requieren para su establecimiento y desarrollo, así, profundidad, pedregosidad, retención de humedad, espacio poroso, textura y contenido de materia orgánica juegan un papel importante (Doran y Parkin 1994, Kaurichev 1984, Marshall *et al.* 1996, Lal 2004, Maschmendt 2005 y Smart *et al.* 2006), en la definición de los requerimiento de las especies en estudio (Bravo-Hollis 1978, Villagra *et al.* 2011).

Los altos porcentajes de pedregosidad de estos suelos hace posible la disponibilidad de agua para las plantas (Nobel *et al.* 1992; Nobel y Zutta 2005, Peters *et al.* 2008) sobre todo después de un evento de lluvia; de la mano con esta propiedad, Maschmendt (2005) considera que la textura influye considerablemente en la erodabilidad, la arquitectura del sistema radical, así como en la profundidad a la que ésta puede llegar, además de ser una de las propiedades del suelo más importantes debido al crédito que tiene sobre la retención de humedad y de nutrimentos, Julca-Otiniano *et al.* (2006) comentan que la MO aumenta la CIC, la capacidad de tampón del suelo y favorece la absorción de nutrimentos, cabe señalar que autores como Havlin *et al.* (2005) refieren que los suelos de zonas semiaridos y áridos son pobres en materia orgánica, no obstante, este componente es particularmente importante en el hábitat de *M. compressa*, del mismo modo que en el de *M. flavicentra* y *M. rekoii* pese a que

se distribuyen en un clima templado, sin embargo, la aridez en su hábitat es edáfica. Por lo anterior los leptosoles líticos son particularmente importantes al constituir un hábitat apropiado para componentes de la familia Cactaceae en ambientes que climática y edáficamente son limitantes para otros taxones.

*Mammillaria compressa* es una especie eficiente en utilizar lo que el ambiente le provee y se ve beneficiada al extender su distribución y asegurar sobrevivencia, por otro lado, el espesor del suelo, pedregoidad así como los sitios tan accidentados y los altos contenidos de materia orgánica, crean su área de distribución actual del hábitat de *Mammillaria flavicentra* y *Mammillaria rekoii*, por último *Mammillaria dixanthoncentron* presenta tolerancia y adaptabilidad a las sales presentes en el suelo (yeso), creando gran especificidad de hábitat que la especie aprovecha en su beneficio, no obstante, confinando su distribución a una menor porción geográfica obteniendo el carácter de endémica.

#### 8.4 Correlaciones

La importante función del suelo en absorber, retener y suministrar agua es considerada por Domingo *et al.* (2006) una de las misiones ecológicas, por tanto analizar las correlaciones existentes entre las propiedades del suelo con su capacidad de retención del agua son de gran relevancia. Algunos componentes de la MO son necesarios en la formación de agregados así como de su estabilidad, de esta forma se generan poros y macroporos continuos lo que origina y aumenta el espacio poroso donde se almacena agua y aire (Lal 2004, Cooper *et al.* 2005), condición que propicia una disminución de la densidad aparente. En el presente estudio se encontraron correlaciones entre las propiedades del suelo que influyen la disponibilidad del agua para las plantas (EP - DA, MO - DA, MO - EP, RH - AR y MO - RH con coeficientes que van de -0.827 a 0.525), con intensidad de muy fuerte a modesta (Fowler *et al.* 1998).

La MO presenta un papel significativo en el mantenimiento de las propiedades físicas del suelo, así mismo se asocia a una mejora en la RH (Sánchez *et al.* 2005, Julca-Otiniano *et al.* 2006 y Simón *et al.* 2013). En zonas áridas, este hecho es importante cuando ocurre un evento de precipitación al prolongar el periodo de humedad para la planta en la zona radical.

Ninguna propiedad del suelo es aislada, por lo contrario, interaccionan creando otorgando beneficios a las especies que ahí se establecen, que se traduce, en condiciones edáficas factibles para su establecimiento y desarrollo exitoso, sobre todo al verse el ambiente edáfico favorecido en la obtención del agua, escasa en éstos sitios donde se les encuentra por lo que se pueden observar cierta similitud en los suelos donde se anclan las cuatro especies.

## 8.5 Análisis de Clúster

La máxima homogeneidad que presentan los suelos donde se establecen las especies se encuentran entre *Mammillaria compressa* y *Mammillaria rekoii*; en tanto que la mayor diferencia se tiene entre *M. compressa* y *Mammillaria dixanthoncentron*, es decir, ésta última especie cuenta con un alto grado de especificidad que le confiere la lejanía entre su ambiente edáfico y de la del resto. Estas semejanzas y disimilitudes indican que las propiedades del suelo como lo menciona Pilbeam (1999) y condiciones ambientales tales como topográficos, gradientes de temperatura, precipitación y altitud (Ferrer *et al.* 2011, Larios-Ulloa *et al.* 2015), determinan el establecimiento y distribución de cada especie en sus respectivos hábitats.

Para *Mammillaria compressa* y *Mammillaria rekoii*, como más cercanas, y de *Mammillaria flavicentra*, la similitud se encuentra inicialmente en tener dos preferencias principalmente, la primera es el establecimiento en leptosoles y la segunda es buscar sitios con pendientes donde la competencia y obtención de recursos sea menor y mayor respectivamente, de ésta forma se crea similitud principalmente en las propiedades DR, DA, porcentajes de arcilla y de materia orgánica.

Cabe señalar la importancia del resto de los factores ambientales que están presentes en el área de establecimiento de las especies y que les confiere disparidad y/o endemismo aún al coincidir en propiedades edáficas, por lo que se sugiere, realizar investigación que contenga variables que para la presente investigación no formaron parte de los objetivos y estar en condición de conocer con mayor profundidad la relación suelo-planta con el conocimiento previo que el suelo es fuertemente influenciado por factores extrínsecos a éste.

*Mammillaria compressa* y *Mammillaria rekoii* requieren o toleran intervalos semejantes en las cuales *M. flavicentra* les sigue. No es inusitado que la lejanía se encuentre en los suelos

donde se ancla *Mammillaria dixanthoncentron* ésta se encuentra en un ambiente altamente específico (yeso).

### 8.6 Concentración de nutrimentos en suelo, Kruskal Wallis y correlaciones rangos de Spearman

*Mammillaria compressa* al ser una especie de amplia distribución y que se establece en diferentes tipos de vegetación, condiciones topográficas y clima, presenta intervalos más amplios en la tolerancia de las propiedades edáficas, conecuentemente también lo hará a las concentraciones de nutrimentos (Cen-Cen *et al.* 2105), como  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^{+}$  entre otros, lo que refleja una alta heterogeneidad del suelo debido a: i) diferente desarrollo (Borges-Gómez *et al.* 2008), como roca andesita, basalto, dolomita y calcárea del presente trabajo, ii) las diversas condiciones ecológicas donde se le encuentra (López *et al.* 2007), y por tanto, presentar concentraciones y dinámicas nutrimentales diferentes (Ewing *et al.* 2007), lo que da origen a que *M. compressa* tolere intervalos amplios en las concentraciones de los diferentes nutrimentos.

Los nutrimentos que presentan diferencia significativa con valor  $p$  igual o menor de 0.05 son Nt,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$  y  $\text{Cr}^{+3}$  en tanto que  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$  y  $\text{Se}^{-2}$  arrojaron un valor  $p$  mayor a 0.05, éstos últimos, mantienen homogeneidad entre los suelos de las diferentes especies. El  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Al}^{+3}$  son nutrimentos que se encuentran abundantes en la corteza terrestre (Valderrama 2008 y Sparks y Huang 1985) a grado tal, que satisfacen la demanda de la planta y no son factores que limitan su desarrollo pero si crean similitud, sin embargo, se debe entender que cada especie demanda concentraciones distintas para su buen metabolismo y éxito en su establecimiento, los organismos pueden requerir cantidades menores que las que están presentes en el suelo, no obstante, un cambio en ésta, provoca que especies más sensibles que otras pongan en riesgo su establecimiento y/o marcar su distribución.

El Nt,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$  y  $\text{Cr}^{+3}$  en un lado opuesto, se caracterizan por ser nutrimentos que presentan disimilitud en su concentración, esta variación se debe a: i) tipo de vegetación, ii) clima (temperatura, precipitación) iii) condiciones topográficas, edáficas

iiii) competencia por los recursos, nodricismo, entre otros factores del ambiente creando especificidad para cada especie lo que determina su establecimiento (Meza-Rangel *et al.* 2014) brindándoles la condición de ser plantas endémicas o raras (Rabinowitz 1981) como en el caso de *Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria reko*.

Para el **Nt** una diferencia se encuentra entre el suelo mineral que sustenta a *Mammillaria reko* por tener los más altos contenidos versus los suelos restantes donde se establecen las especies. *Mammillaria reko* se ve beneficiada al encontrarse en suelos con un alto porcentaje de MO que se origina del desfronde en mayor cantidad a la de los matorrales así como la presencia de bacterias fijadoras de nitrógeno en la rizósfera y, junto con la precipitación superior del bosque de *Quercus* (Rzedowski 1978) otorga tazas mayores en la descomposición y mineralización de la MO, así como un incremento de los exudados necesarios favoreciendo el enriquecimiento bacteriano, además y como fuente principal, es la presencia en las paredes de líquenes y briofitas y cianoficias que presentan asociación con bacterias también responsables de fijación de nitrógeno (Mayz-Figueroa 2004, Celaya-Michel y Castellanos-Villegas 2011) y que por escorrentía *M. reko* obtiene el beneficio de tener en el suelo buen contenido de nitrógeno.

Una diferencia más se encontró entre *Mammillaria compressa* y *Mammillaria dixanthoncentron*. La primera al ser nodrizada por especies que crean simbiosis para la fijación de nitrógeno como las leguminosas (*Mimosa biuncifera*, *Prosopis laevigata*, entre otras) y que se encuentran presentes en diferentes zonas del presente estudio, así condiciones favorables referidas por Celaya-Michel y Castellanos-Villegas (2011) al comentar que, en la vegetación de zonas áridas y semi áridas se crean islas de fertilidad bajo el dosel donde se guarda mayor humedad e incrementan los procesos para la obtención de nutrimentos en general.

Mientras tanto, *Mammillaria dixanthoncentron* al establecerse en suelos yesíferos, trae como consecuencia, bajo contenido de nitrógeno marcando una disimilitud marcada con la parte mineral encargada de establecer a *M. compressa*.

La concentración de  $\text{Ca}^{+2}$  no es similar entre suelos de *Mammillaria flavicentra* y *Mammillaria dixanthoncentron*, esta última se encuentra en suelos yesíferos ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que conducen a un incremento del  $\text{Ca}^{+2}$ , con alta solubilidad,  $2.0 \text{ g L}^{-1}$  (Badia 1992), en sitios donde la precipitación es superior (bosque tropical caducifolio) en tanto que, el carbonato de

calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), componente principal de la roca caliza originaria de los suelos de *M. flavicentra*, presenta una solubilidad de  $0.013 \text{ g L}^{-1}$  (Navarro y Navarro 2013), lo cual es ciento cincuenta veces inferior a la del sulfato de calcio dihidratado y, con precipitación inferior (bosque de *Quercus*-matorral xerófilo) impacta en una disminución en la concentración de este nutrimento en los suelos.

La gama de condiciones y diversificación de las propiedades del suelo, inciden directamente en las concentraciones de los nutrimentos, por tanto la fertilidad de los suelos se adecua a cada caso, de tal forma que, para una especie los requerimientos de éstos serán más elevados que para otras, sin embargo, el establecimiento con éxito para cada caso, concomitantemente a las condiciones ambientales juegan un papel importante en la fertilidad de los suelos. Los microambientes también cambian la dinámica de la fertilidad, y es por eso que el suelo es considerado una entidad heterogénea y valorar la fertilidad es una encomienda compleja de realizar. Para llegar a este diagnóstico se sugieren diferentes rutas, a través de la comparación de la intensidad de sus propiedades con referencia establecida mediante procedimientos empíricos (Brown 1987) a través de enfoques mixtos, esto es, basarse en el entendimiento del funcionamiento de un sistema y una validación empírica de la deducción (Rodríguez 1993).

El análisis nutrimental realizado en el suelo para las cuatro especies, muestra que donde se establece *Mammillaria rekoii* se desarrolla con las más altas concentraciones de Nt,  $\text{Na}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Cr}^{+2}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$  y  $\text{Cu}^{+2}$ , mientras que el de *Mammillaria dixanthoncentron* es más rico en  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Al}^{+3}$ . En una condición opuesta, se encuentra el suelo donde crece *Mammillaria compressa* que destaca porque ningún nutrimento es el más concentrado de los aquí estudiados; en una posición intermedia se encuentra el ambiente edáfico de *Mammillaria flavicentra*, no obstante, cabe destacar que se establece en suelos con las más bajas concentraciones de Nt,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$  y  $\text{Al}^{+3}$ .

## 8.7 Nutrimientos a través del sistema suelo-planta y Prueba de Kruskal Wallis

Cuando se comparan las concentraciones de los nutrimentos estudiados en el suelo con las encontradas en el tejido vegetal de la planta, particularmente el tallo, se observa que, *Mammillaria rekoii* tiene las más altas de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$  y  $\text{Cr}^{+2}$  que se corresponden con las registradas en el suelo, es decir, altas concentraciones en suelo y tallo, sin embargo, ésta planta también demanda  $\text{Mg}^{+2}$ , que el suelo le provee sin ninguna restricción. Cabe señalar que ésta especie vegetal tiene en el tallo la más alta concentración de  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$  y  $\text{Al}^{+3}$ , ninguno de los cuales es el más abundante en el suelo, no obstante, tiene lo necesario que demanda el tejido vegetal, o en todo caso, la planta tiene mecanismos que le permiten su bioacumulación a concentraciones superiores a las otras mammillarias, esto significa que, la planta los requiere para su establecimiento, desarrollo y reproducción, lo cual la ubica como la especie que más estrecha relación guarda, desde el punto de vista nutrimental, con el suelo.

*Mammillaria dixanthoncentron* es la segunda especie vegetal estudiada en cuyos suelos se encuentran las más altas concentraciones de algunos nutrimentos como  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ , y  $\text{Al}^{+3}$ , sin embargo, en el tallo no son las más altas, excepto  $\text{K}^+$ . En este sentido, el suelo favorece a ésta especie por sus altas concentraciones de  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Al}^{+3}$  en solución que podrían ser quizá tóxicas para otras especies, pero no para *M. dixanthoncentron* al tener tolerancia, por tanto, las cantidades de los seis elementos abundantes en el suelo determinan su distribución edáfica. En el sistema radical se encuentran variadas las concentraciones, es decir, la adquisición de los nutrimentos antes mencionados, pasarán por el sistema radical en mayor o menor concentración dependiendo de las necesidades de la planta, en ciertos casos no lo biocumulará en éste órgano, como el  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Al}^{+3}$ , mientras que en otros existe un aumento como en el caso de  $\text{K}^+$  y  $\text{Ni}^{+2}$ .

Opuesto al suelo donde crece *Mammillaria rekoii* y *Mammillaria dixanthoncentron*, a *Mammillaria compressa* se le encuentra en un ambiente más restrictivo desde un punto de vista nutrimental, pues pocos nutrimentos se encuentran en mayor concentración, no obstante, el  $\text{Nt}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$  y  $\text{Cd}^{+2}$  tienen la más alta concentración en el tallo, cabe señalar, que el suelo tiene bajas concentraciones y la planta los requiere para su metabolismo, por esta razón,

los bioacumula hasta concentraciones fisiológicamente requeridas para el desarrollo óptimo de sus funciones, esto la ubica como la especie más eficiente en el uso de sus recursos nutrimentales con una dependencia directa del suelo en cuanto a adquisición se refiere.

Finalmente, *Mammillaria flavicentra* no crece en suelos ricos en nutrimentos, de manera que la relación suelo planta es de las más corrientes en la naturaleza, es decir, la especie tiene estrategias para obtener los nutrimentos, o bien, su velocidad de crecimiento está en función de la disponibilidad de estos. Es posible que su endemidad se deba a factores ambientales como climáticos, biológicos y/o fisiográficos. No obstante, se establece en suelos pobres de Nt,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Al}^{+3}$  como ya se mencionó, sin embargo, el  $\text{Na}^+$  y  $\text{Al}^{+3}$  son nutrimentos que de encontrarse con las concentraciones más bajas en suelo, es capaz de contener prácticamente la misma concentración en tallo que el resto de las especies, lo cual muestra, que *M. flavicentra* es eficiente en la obtención de éstos elementos.

El sistema radical, como órgano de interfase entre el suelo y el tallo, en las cuatro especies actúa como órgano selector y de acumulación de nutrimentos, en él se observan más altas cantidades y concentraciones de Nt,  $\text{K}^+$  y  $\text{Al}^{+3}$ , los dos primeros son nutrimentos esenciales, de manera que, éste órgano cumple con una función importante para que oportunamente la planta cuente con el balance nutrimental requerido durante su crecimiento y reproducción. Respecto a la acumulación del  $\text{Al}^{+3}$ , es nutrimento no esencial, más bien es considerado tóxico, probablemente que su presencia en el sistema radical se debe a una absorción pasiva y su bioacumulación representa un mecanismo por parte de la planta para evitar su translocación a la parte vegetativa del organismo y evitar un efecto de toxicidad, esto implicaría que la planta cuenta con una forma de eliminación a nivel del cuello de la raíz.

En lo referente a la función del órgano (sistema radical) como selector, se observa que existen nutrimentos que aún con concentraciones altas en suelo como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$  y  $\text{Pb}^{+2}$ , no se encuentran en la misma o semejante proporción en la planta, lo cual, sugiere que la obtención de éstos nutrimentos se da exclusivamente por las necesidades de los organismos, las cuales son particulares en cada caso, por tanto, para el tallo no le es menester la bioacumulación aún y cuando el suelo le proporciona altas concentraciones.

De manera general no se observa una tendencia general para todos los nutrientes de aumento o disminución en las cantidades y concentración a lo largo de los diferentes diámetros del sistema radical. La planta los absorbe del suelo y concentra (o no necesariamente) en este órgano, de aquí se traslocan al tallo en la cantidad y proporción demandadas por la planta según los equilibrios fisiológicos que ésta demanda de acuerdo con los requerimientos de su metabolismo.

La concentración a lo largo del sistema suelo-planta, considerando al sistema radical como interfase entre estos dos, presentó diversidad en la concentración en sus diferentes almacenes de especie a especie, suelos e incluso dentro del sistema radical de un diámetro a otro, lo que sugiere una alta heterogeneidad en las condiciones edáficas e internas de cada especie que determinan la tolerancia/necesidad a la concentración de cada nutriente, para esto, se puede referir, y ponderando de la misma forma la capacidad de absorción y bioacumulación, misma que depende además de un código genético propio de cada especie, de cada uno de los factores ambientales, que da como resultado, una diversificación específica y distribución marcada; por lo anterior el factor suelo, tiene gran influencia en la especiación y establecimiento de las especies.

A lo largo del sistema radical y en el tallo la concentración depende principalmente de factores importantes como: i) la concentración disponible que se tenga en el suelo, ii) la capacidad del sistema radical para su absorción, iii) la función que éste tenga en el organismo como los mencionados por Marschner (2011): constituyentes celulares, enzimas o coenzimas, como antagonicos y entre otros para cubrir la demanda y necesidades de las plantas. Coraspe-León *et al.* (2008) indican que la fase de crecimiento de las plantas también es un factor a considerar para entender las concentraciones en cada órgano.

Por razones, como las anteriormente mencionadas, no se encuentra uniformidad general en la concentración de los nutrientes a lo largo del  $S_R$  y del tallo como se presenta en los resultados; al paso de los diferentes diámetros del sistema radical de las especies podemos observar que existen ascensos y descensos de los nutrientes en cuanto a su concentración. Sin embargo, el sistema radical fino o las partes jóvenes de la raíz tienen un papel relevante en la absorción de nutrientes y de agua (Gaitán *et al.* 2005), al presentar gran superficie de contacto con el suelo, que para este trabajo, las raíces jóvenes se asignaron a un diámetro de 0.0 a 0.5mm (D1).

Adviértase, que D1 presenta un papel importante en la adquisición nutrimental aunque no exista un patrón similar entre las especies en su forma de obtener los requerimientos necesarios, por tanto, se esperarían concentraciones superiores a la del suelo o semejantes, y aunque en algunos nutrimentos si se encuentra (como en Nt y  $K^+$  de manera uniforme para las cuatro especies), en otros se presenta la inversa, es decir, una disminución en D1 respecto al suelo (como en  $Cu^{+2}$ ) mientras que en la mayoría se deben observar de manera independiente los nutrimentos, en cada especie ya que al realizar la comparación se tiene desemejanza, esto por la influencia de factores y procesos que determinan la concentración y/o absorción por parte del sistema radical fino de manera particular e independiente.

Córdoba (1976) menciona la Ley del mínimo, *“cada elemento, individualmente considerado, provoca un efecto individual en la planta, siendo este efecto independiente de la presencia y concentración de otros elementos que puedan ser considerados. Para que tal efecto se produzca, el elemento debe alcanzar una concentración mínima en la planta y una vez desencadenado, el aumento en la concentración traerá consigo un aumento en la cantidad del efecto, pero no en que éste se dé”*.

Se considera por otro lado, que la raíz presenta una capacidad selectiva para la absorción de nutrimentos importantes para el desarrollo, por lo que algunos serán preferidos como Nt y  $K^+$  tan importante para el equilibrio hídrico de las plantas; no obstante, ésta capacidad es limitada y se da por fuerzas físicas más que selectivas (Nieves-Cordones *et al.* 2016), por ende, existen elementos no esenciales dentro del sistema radical como  $Cd^{+2}$ ,  $Al^{+3}$ ,  $Pb^{+2}$ ,  $Se^{-2}$  y  $Cr^{+3}$ . Aunado a esto, se deben considerar propiedades del suelo importantes que influyen en la capacidad de las raíces en la obtención de nutrimentos como el pH por tres razones primordiales: i) por causar deficiencias de algunos elementos, ii) por inducir exceso nocivo en otros y iii) por un efecto directo en el desarrollo vegetal.

La causa de las concentraciones y variaciones encontradas en el resto de diámetros (D2-D5) para las cuatro especies se explican al exponer el hecho que el resto del sistema radical tiene la función de almacenar principalmente, no obstante, presentan también la capacidad de absorción a través de los pelos radicales, sin dejar de mencionar, que los lugares principales de entrada de los distintos iones por las raíces difieren según la especie (Scott y Martin 1962). A ésta información se une la expuesta por Delgado *et al.* (2008) pues considera que las características del  $S_R$  asociadas a la absorción se orientan especialmente hacia la

longitud, área y profundidad de enraizamiento, la cual se ajusta a esta investigación al presentar D1 la longitud más extensa en tres especies y una profundidad óptima para la obtención inmediata de los recursos.

El **Nt**, además de presentar diferencia significativa en los suelos, es el único en presentarlas también a lo largo del sistema radical y tallo en todas las especies con valor  $\rho$  de 0.00, este último órgano supera el contenido respecto al suelo. Zeréga *et al.* (1997) infieren que un organismo requiere de altos contenidos de nitrógeno primordialmente por ser el componente principal de las proteínas, de la clorofila y del protoplasma; además se sugiere es uno de los macronutrientes por el cual las especies desarrollan estrategias ecológicas para su obtención como se indicó en las secciones 8.1 y 8.2 por ser considerado por Jarquín-Sánchez *et al.* (2011), como el elemento más importante en la nutrición de la planta y antagónicamente llamarle según Celaya-Michel y Castellanos-Villegas (2011), como el más limitante para la productividad de las plantas especialmente en zonas áridas y semiáridas.

En un encauzamiento diferente del Nt, se tiene que, pese a que *Mammillaria rekoii* se establece en suelos con el mayor contenido de Nt, es *Mammillaria compressa* la que más contenido presenta en el tallo, lo que la hace una especie eficiente en bioacumular este nutriente, resultado que se puede explicar, por ser la especie de mayor biomasa en la mayoría de los casos, por ende mayor requerimiento de este nutriente. Por otro lado, *Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthoncentron* y *M. rekoii*, presentan estrategias diferentes a *M. compressa*, éstas no tienen gran biomasa, además, traslocan el nutriente conforme a sus necesidades razón por la cual, la mayor biocumulación se presenta en el sistema radical.

La concentración de **Ca<sup>+2</sup>** se diferencia claramente entre dos pares de especies, *Mammillaria compressa* y *Mammillaria dixanthoncentron*, respecto a *Mammillaria flavicentra* y *Mammillaria rekoii*; la primer dupla, por arriba en la concentración en la cual *M. dixanthoncentron* exhibe las más altas tanto en suelo como en tallo lo que infiere que para esta especie es uno de los macronutrientes que más demanda al establecerse sobre suelos con elevados contenidos de sulfato de calcio dihidratado (yeso). El Ca<sup>+2</sup> es particularmente responsable de la síntesis de pared celular dándole rigidez, con muy baja movilidad en las

plantas (Rending y Howard 1989, Potocic *et al.* 2005) y su contenido aumenta con la edad (Rojas 1988) en tanto Park *et al.* (2008) le otorgan connotación a éste nutrimento a la construcción del sistema radical fino, razón por la cual *M. compressa* le sigue al presentar una de las redes más compleja de éste diámetro.

En otro enfoque del  $\text{Ca}^{+2}$ , el sistema radical de las cuatro especies disminuyen la concentración de éste nutrimento con respecto a la que se encuentra en el suelo, no obstante, nuevamente las cuatro especies muestran un incremento en el tallo respecto a las concentraciones del sistema radical. Lo anterior nos muestra que, independientemente de las concentraciones en cada sistema de las cuatro especies, sean éstas bajas o altas, tienen en común mecanismos para biocumularlo en el tallo, además, de no presentar una adquisición por parte del sistema radical superior y de esta forma responder a las concentraciones elevadas del suelo.

Al igual que los dos primeros nutrimentos, el  $\text{Mg}^{+2}$  es considerado importante en el metabolismo de las células. Shaul (2002) menciona que es el catión divalente más abundante en el citosol de las células y pequeñas variaciones en la concentración se ve fuertemente afectado el cloroplasto, además, participa principalmente en el proceso de fotosíntesis al ser componente básico de la clorofila (Zeréga *et al.* 1997). Por tal razón se le haya en mayor concentración en tallo que en suelo y sistema radical, excepto *M. dioxanthocentron*, así mismo, en suelos, éste se puede perder fácilmente por lixiviación en un episodio de lluvia más no así en tejido vegetal donde presenta una gran movilidad (Fisher *et al.* 2015), y cuando no es suficiente en la rizósfera es traslocado por otra parte de la planta, vía floema, hacia puntos de crecimiento activo (Cakmak y Kirkby 2008).

Aunque las concentraciones de  $\text{K}^{+}$  son menores en el suelo donde se establecen las cuatro especies, la planta absorbe grandes cantidades tanto tallo como sistema radical, lo que supone existe absorción selectiva. Nieves-Cordones *et al.* (2016) y se observa bioacumulación por parte del sistema radical. El  $\text{K}^{+}$  otorga el beneficio de la regulación osmótica, desde un punto de vista biofísico, y en conjunto con el  $\text{Na}^{+}$  han demostrado ser un factor determinante en la tolerancia a la sal de los suelos, además de ser un ion coordinador de ciertas reacciones enzimáticas. *M. compressa* al establecerse en las condiciones climáticas más drásticas y

considerando la succulencia, al igual que en el resto, es la especie que más  $K^+$  presenta en el tallo aún presentando las más bajas del suelo mineral versus los suelos restantes.

En resumen, las concentraciones del suelo no aseguran que las especies vegetales contengan en proporción las mismas cantidades y/o concentraciones, sean bajas o altas, más bien esto dependerá de la función que tenga cada nutriente dentro de la planta y como respuesta, el organismo lo adquirirá en mayor o menor cantidad, además, deben considerarse factores extrínsecos al suelo y que pueden modificar la concentración de los nutrientes; del mismo modo y atendiendo al mismo fundamento, el sistema radical mostrará un aumento o disminución de almacenaje y traslocación. Lo anterior, muestra que las plantas han desarrollado estrategias para la bioacumulación o bien, para evitar toxicidad por algunos elementos en el cual el sistema radical, indudablemente, juega un papel fundamental.

En *Mammillaria rekoii* se corresponden las concentraciones en suelo y tallo de  $Na^+$ ,  $Zn^{+2}$ ,  $Ni^{+2}$  y  $Cr^{+2}$  y altas en tallo y bajas en suelo para  $Mg^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$  y  $Al^{+3}$  demostrando ser la especie que guarda una relación más íntima con el suelo. En *Mammillaria dixanthocentron* las concentraciones de  $K^+$  son similares en suelo y tallo, además es capaz de establecerse en suelos con altas concentraciones de  $Fe^{+2}$  y  $Al^{+3}$ , mientras que el  $Ca^{+2}$  es un nutriente indispensable para el exitoso establecimiento de la especie.

Para *Mammillaria compressa* las concentraciones de Nt,  $K^+$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$  y  $Cd^{+2}$  se encuentran altas en tallo y bajas en suelo, esta especie posee un mecanismo para eludir las altas concentraciones de  $Pb^{+2}$ . Por tanto, es la especie que presenta menor especificidad y alta capacidad de adaptarse a suelos con menor concentración de nutrientes.

Finalmente *M. flavicentra* se caracteriza por establecerse en suelos pobres de Nt,  $Ca^{+2}$ ,  $Na^+$  y  $Al^{+3}$ .

## 8.8 Morfología del sistema radical

El estudio del sistema radical ( $S_R$ ) presenta suma importancia, pues es éste, el que aporta conocimiento de la planta de forma integral (Osuna-Ceja 2006), a través de la absorción de agua y nutrimentos es capaz de realizar una transformación a tejidos y órganos vegetales. Su arquitectura depende de dos factores primordiales, el crecimiento de sus raíces y su ramificación.

En la presente investigación se le localizó el  $S_R$  en los primeros 10 cm de profundidad y con ramificación de forma horizontal en el total de especies del género *Mammillaria*; no obstante, cabe señalar que la profundidad en que se puede encontrar depende de factores como la edad, el sitio de establecimiento y las condiciones edáficas (Álvarez-Sánchez y Naranjo 2003, Osuna-Ceja 2006, Fabio *et al.* 1994), tal y como se señaló en la descripción del  $S_R$  de las cuatro especies, además de recordar que el suelo de preferencia para establecerse por parte de las especies es Leptosol lítico, característico por ser somero y pedregoso (WRB 2007), razón por la cual, hay organismos donde el  $S_R$  presenta su orientación tomando la forma de las grietas de las rocas y obtener desarrollo más en la vertical que en la horizontal, mismo sentido que se tiene en etapas iniciales de desarrollo donde las raíces buscan anclaje, así como contacto con suelo a una profundidad donde no sea una limitante la adquisición de agua y nutrimentos para su supervivencia; posterior a esta etapa de establecimiento su máximo desarrollo será de forma horizontal.

Por otro lado, Sudzuki (1995) infiere que en climas extremos, como los de zonas áridas y semiáridas, el sistema radical suele presentar desarrollo lateral para absorber agua del suelo cerca en la superficie, además, de considerarla característica xeromórfica que le permite sobrevivir por periodos prolongados de sequía, que le asegura aprovechar cualquier llovizna que sea aprovechable antes de evapotranspirar o infiltrarse para tomar el tan valioso recurso.

Las especies que presentaron sistema radical que se extiende lateralmente en los primeros 10 cm de espesor del suelo son: *Mammillaria compressa*, *Mammillaria Flavicentra* y *Mammillaria dixanthoncentron*. En éste espesor del suelo, existe la mayor cantidad de nutrimentos debido a una mejor retención de humedad ocasionada por la gran cantidad de

rocas, además de la importancia de las propiedades edáficas que ayudan a la penetración de raíces (Kaurichev 1984, Doran y Parkin 1994, Marshall *et al.* 1996, Lal 2004, Smart *et al.* 2006).

Se establece la hipótesis que la raíz principal de las cuatro especies del género *Mammillaria* degenera, probablemente por presentar crecimiento determinado (Dubrovsky 1997), con pocos ciclos de división celular a una corta edad, sin embargo, el agotamiento del meristemo varía de una especie a otra. Este evento ocurre con el propósito de propiciar el crecimiento lateral, el cual es muy abundante en *M. compressa*, y establecer rápidamente mayor número de sitios de contacto y obtener los mínimos requerimientos (principalmente agua) para su establecimiento y posterior desarrollo. Shishkonova *et al.* (2006) en un estudio con *Stenocereus gummosus* y *Ferocactus peninsulæ* evidenciaron el patrón de crecimiento determinado de la raíz primaria y regeneraron raíz a partir de callo que también presentó el mismo desarrollo, lo que infiere que el código genético para esta respuesta se encuentra dado aun existiendo estímulos diferentes.

En lo referente al inicio de la ramificación, las cuatro la comienzan inmediatamente después del cuello del tallo (punto de encuentro entre la raíz y tallo), el número y/o densidad de las raíces presentes depende en gran medida por la edad de la planta además de las propiedades del suelo (Smart *et al.* 2006).

Las raíces de mayor diámetro, tienen la función como lo denomina Stokes *et al.* (2009), proporcionar anclaje en el suelo de manera vigorosa, son consideradas en conjunto con la fuerza de arraigo, factores determinantes en la supervivencia inicial de las planta, es en este punto, donde la genética cobra gran relevancia como lo mencionan Pritchett (1996) y Hermann (1977), la forma y dirección tiene mayor influencia por éste factor, más que por el ambiente edáfico, no obstante, se sugiere que se debe tomar en cuenta ambos factores en respuesta al desarrollo y anclaje, ya que éstas, se modifican, en etapas tempranas, por esquivar obstáculos como rocas, raíces de otras especies para evitar competición o factores como lo menciona Snyman (2006), entre ellos, mayor o menor actividad biológica, variación de las propiedades físicas del suelo que pueden impactar y hasta comprometer la supervivencia de la planta. Por último, por ser las raíces responsables de la estabilidad de la planta en el suelo, el número de ellas será menor a las que se encuentran lejos de la zona basal del tallo.

Fabio *et al.* (1994) hacen mención que el sistema radical fino, “raicillas”, responden directamente a las condiciones edáficas, tales como textura, disponibilidad de agua, densidad aparente y estructura, a esta última propiedad Osuna-Ceja (2006), le da gran importancia al indicar que controla la distribución, flujo y retención del agua, sustancias disueltas y gases; Vaz *et al.* (2001), refuerza lo anterior al mencionar que la estructura y su estabilidad son los factores que más influyen en el crecimiento de estas raíces así como a todo el  $S_R$  al proporcionar oxigenación suficiente, en este sentido y de forma más puntual, Park *et al.* (2008), le otorga connotación a la construcción de este diámetro a la presencia de  $Ca^{+2}$  que en los suelos de la presente investigación no es un limitante, particularmente donde crece *Mammillaria dixanthocentron* y *Mammillaria compressa*.

En otro sentido, Gaitán *et al.* (2005) y Baker *et al.* (2001), indican que estas raicillas presentan una gran superficie de contacto con el suelo, la exploración es mayor para la búsqueda de nutrimentos; a este diámetro se le da el mérito de ser las responsables de la obtención y absorción de nutrimentos para su translocación, además su forma y abundancia constituyen una malla que mejora la cohesión del suelo (Mao *et al.* 2012), con lo que las tasas de erosión disminuyen, sin embargo, son el diámetro que más se pierde en el momento del muestreo por ser tan finas tanto en longitud, como en diámetro.

Por observaciones de campo, se manifiesta el hecho de que las raíces finas son sacrificadas periódicamente, son efímeras y por lo tanto reemplazadas continuamente por nuevas (Mullins *et al.* 1992); fenómeno se da en respuesta a la disponibilidad principalmente de agua, limitando su sobrevivencia al ser uno de sus principales componentes, por tal renovación, se presenta coloración diferente entre las raíces nuevas (más claras) y las antiguas (oscuras).

Por su parte el sistema radical secundario en las cuatro especies muere año con año y son reemplazadas por nuevas, con la posibilidad de reconstruirlo y orientarlo hacia la exploración de un volumen de suelo diferente al explorado por la raíz precedente, asegurando de esta forma, la nutrición de la planta. El periodo en el que ocurre con mayor frecuencia la pérdida de parte del  $S_R$  es en la época de sequía, mientras que las lluvias son aprovechadas por parte de las raíces y generan nueva biomasa.

En *Mammillaria compressa* se observó un sistema radical compuesto por seis a siete raíces desplegadas en forma radial, lo que ayuda a explorar una mayor área de suelo al presentar éste acomodado. Es la especie que presenta el  $S_R$  con dimensiones superiores, por el mismo factor de presentar mayor cantidad de biomasa.

Únicamente *Mammillaria rekoii* tiene un sistema radical que penetra a más de 10 cm de profundidad cuando el suelo es profundo, asimismo y por consiguiente, se destaca ésta especie por poseer el típico sistema radical fibroso, donde se observa una urdimbre de raíces finas donde cada una de éstas se ramifica lateralmente (Campbell y Reece 2007).

La buena comprensión de la morfología, arquitectura y funcionamiento del sistema radical otorga importante conocimiento de la planta en su totalidad, desde conocer las propiedades edáficas que tienen influencia en el diseño de raíces o de la misma zona alrededor de esta (rizósfera) que con sus exudados puede inhibir el crecimiento cerca de otras especies o absorber iones específicos (Hawes *et al.* 2000), otorga además un mejor panorama de las condiciones ambientales y al englobar el conocimiento se pueden crear estrategias de conservación bien definidas.

Cabe mencionar que los estudios sobre sistemas radicales son diversos Fabio *et al.* 1994 Osuna-Ceja 2006, Snyman 2006, Park *et al.* 2008, Mao *et al.* 2012, no obstante, no se cuenta con suficiente investigación donde se desarrollen metodologías integrales para conocer y analizar la morfología y arquitectura con relación a los factores edáficos, climáticos, fertilidad del suelo, microambientes, factores antropogénicos y establecer a la vez con este conocimiento estrategias de conservación, asegurando el ambiente óptimo para su establecimiento e incorporar la descripción del  $S_R$  a la descripción botánica de las especies e incluir este órgano a la determinación de especies.

## IX. CONCLUSIONES

Las cuatro especies del género *Mammillaria* se desarrollan en leptosoles líticos, no obstante *Mammillaria compressa* presenta plasticidad edáfica, al establecerse en Regosol calcárico, Phaeozem vértico, Phaeozem calcárico, Kastanosems háplico, Leptosol esquelético y Leptosol réndzico, cualidad que le permite una mayor distribución geográfica y ecosistémica.

*Mammillaria compressa* guarda una relación directa del tamaño de la colonia con el tipo de suelo, en Leptosol lítico se encuentra solitaria y/o escasa ramificación, en Regosol calcárico adquiere dimensiones de hasta 2 m de diámetro.

*Mammillaria compressa* es la especie que se establece en los suelos más bajos de recursos.

Las propiedades del suelo más necesarias para el establecimiento de las cuatro especies por altos o bajos contenidos son pedregosidad y materia orgánica.

*Mammillaria flavicentra*, *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria reko*i presentan predilección para establecerse entre fisuras de rocas o suelos someros y muy pedregosos.

*Mammillaria compressa* y *Mammillaria reko*i se establecen en suelos con propiedades físicas y química similares.

*Mammillaria dixanthoncentron* se establece en suelos yesíferos, su densidad poblacional y tamaño de los individuos es menor a medida que la cantidad de yeso disminuye. Éste mineral otorga especificidad del ambiente edáfico.

La cercanía de los ambientes edáficos (física, química y nutricional) se presenta entre *Mammillaria compressa* y *Mammillaria reko*i por otro lado *Mammillaria dixanthoncentron* y *Mammillaria reko*i.

La endemidad edáfica de *Mammillaria reko*i está determinada por la alta cantidad de nutrientes disponibles destacando Nt, Na<sup>+</sup>, Zn<sup>+2</sup>, Cr<sup>+3</sup>, Pb<sup>+2</sup> y Cu<sup>+2</sup> en tanto que para *Mammillaria dixanthoncentron* el ambiente es rico en Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup> Fe<sup>+2</sup> y Al<sup>+3</sup>.

*Mammillaria flavicentra* se destaca en el suelo donde se establece presentar altos contenidos de materia orgánica, Mn<sup>+2</sup> y Se<sup>-2</sup> y bajos de Nt, Ca<sup>+2</sup>, Na<sup>+</sup> y Al<sup>+3</sup>.

En tallo de *Mammillaria compressa* presenta las concentraciones más altas de Nt, K<sup>+</sup>, Fe<sup>+2</sup>, Cu<sup>+2</sup> y Cd<sup>+2</sup>, mismos que se encuentran bajos en suelo, la demanda en los tejidos muestra la relación de dependencia del ambiente edáfico.

El Ca<sup>+2</sup> es el nutriente indispensable para el exitoso establecimiento de *Mammillaria dixanthoncentron* al presentar concentraciones más altas en todo el sistema suelo-planta.

En *Mammillaria reko* se corresponden las concentraciones en suelo y tallo de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$  y  $\text{Cr}^{+2}$  y altas en tallo y bajas en suelo para  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$  y  $\text{Al}^{+3}$  demostrando ser la especie que guarda una relación más íntima con el suelo.

El sistema radical de las cuatro especies no presenta un patrón definido de almacenamiento de nutrimentos, este atiende las necesidades específicas de cada planta.

*Mammillaria compressa* al presentar ramificación basítona, cuenta con un sistema radical con dimensiones superiores respecto a las tres especies estudiadas.

El sistema radical fino de *Mammillaria compressa* es sacrificado anualmente durante la época seca y al menos una sexta parte del sistema radical cada dos años.

El sistema radical fino de *Mammillaria flavicentra* es sacrificado anualmente durante la época seca.

La profundidad a la que el sistema radical se encuentra cuando las especies se establecen entre fisuras de rocas puede ser mayor de los 10 cm.

## X. REFERENCIAS

- Abd El-Ghani M.**, Soliman A. y Abd El-Fattah R. 2014. Spatial distribution and soil characteristics of the vegetation associated with common succulent plant in Egypt. *Turkish Journal of Botany* **38**:550-565.
- Alvarado A.** y Forsythe Warren. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* **29**(1): 85-94.
- Álvarez R.**, Godínez-Álvarez H., Guzmán U. y Dávila P. 2004. Aspectos ecológicos de dos cactáceas Mexicanas amenazadas: implicaciones su conservación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **75**:7-16.
- Álvarez-Sánchez J.** y Naranjo G. 2003. Eds. Álvarez-Sánchez J. y Naranjo-García E. *Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México*. Instituto de Ecología, A.C., UNAM. Xalapa, México.
- Anaya L. A. L.** 2003. *Ecología química*, Ed. Plaza y Valdés, México D.F.
- Anderson E. F.** 2001, . *The cactus family*, Timber Press, Inc. Portland, Oregon U.S.A.
- Anderson J. M. E.** e Ingram, J. S. 1993. *Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods*. CAB Internatinal, Oxford U.S.A.
- Arias S.**, Gama-López S., Guzmán-Cruz L. U. y Vázquez-Benítez B. 2012. Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán, fascículo 95. Cactaceae Juss. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Armas C.** y Pugnaire F. I. 2005. Plant interactions govern population dynamics in a semiarid plant community. *Journal of Ecology* **93**:978-989.
- Badia V. D.** 1992. Suelos afectados por sales. *Butll. Soc. Cien.* **XIII**:609-629.
- Baker T. T.**, Conner W. H., Lockaby B.G., Stanturf J.A., Burke M.K. 2001. Fine root productivity and dynamics on a forested floodplain in south Carolina. *Soil Science Society America Journal.* **65**:545-556.
- Barchuk A. H.** y Díaz M. P. 2005. Effect of shrubs and seasonal variability of rainfall on the establishment of *Aspidosperma quebrachoblanco* in two edaphically contrasting environments. *Austral Ecology* **30**:695-705.
- Bautista Z. F. A.** y Palacio G. 2005. Caracterización y manejo de los suelos de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. Mérida.
- Bautista-Zúñiga F.**, Jiménez-Osornio J., Navarro-Alberto J., Manu A. y Lozano R. 2002. Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en leptosoles cársticos. *Terra* **21**:1-11.
- Becerra R.** 2000. Las cactáceas, plantas amenazadas por su belleza. *CONABIO. Biodiversitas* **32**:1-5.
- Borges-Gómez L.**, Soria-Fregoso M., Casanova-Villarreal V., Villanueva-Cohuo y Pereyda-Pérez G. 2008. Correlation and calibration of phosphorus analysis in soil from Yucatán, México, for growing habanero peppers. *Agrociencia* **42**: 21-27.
- Bouyoucos G. J.** 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agronomy Journal* **54**:464-465.
- Bravo-Hollis H.** 1978. *Las Cactaceas de México*, 2a. ed. Vol. 1, Universidad Nacional de México, México D.F.
- Bravo-Hollis H. y Sánchez-Mejorada H.** 1991. *Las Cactáceas de México*, Vol. 2 UNAM, México, D.F., México.
- Britton N. L.** y Rose J. L. 1963. *The Cactaceae. Description and illustrations of the plants of the Cactus Family, Vol II* . Dover Publications, Inc. NY.
- Brown J. R.** 1987. *Soil testing: sampling, correlation, calibration and interpretation*. Soil Science Society of America Journal. Special Publication No. 21. SSSA Inc. Madison, Wisconsin. USA.
- Butterworth C. A. y Wallace R. S.** 2004. Phylogenetic studies of *Mammillaria* (Cactaceae) insights from chloroplast sequence variation and hypothesis testing using the parametric bootstrap. *American Journal of Botany* **91**(7):1086-1098.

**Cakmak I.** y Kirkby E. A. 2008. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia Plantarum* **133**(4):692-704.

**Campbell N. A.** y Reece J. B. 2007. *Biología* 7ª ed. Médica Panamericana ed. Buenos Aires, Madrid.

**Castruita S. M. A.,** Gutierrez C. Ma. Del C., Ortiz S. C. A. y Gómez D. D. J. 2000. Suelos arcillosos de la zona oriente del Estado de México. *Terra* **18**(1):35-44

**Celaya-Michel H.** y Castellanos-Villegas A. 2011. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Terra Latinoamericana* **29**(3):343-356.

**Cen-Cen E. R.,** Gómez-Merino F. Y Martínez-Hernández A. 2015. Tolerance of Agave tequilana to high levels of divalent metal cations. *Polibotánica* **40**:163-182.

**CITES** 2007. Convencion sobre el comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre. <http://www.cities.org/esp/disc/how.shtml>. Pagina consultada 23 de febrero de 2016.

**Comerford N. B.** 1999. Mecanismos de captación de nutrimentos en ecosistemas forestales: de cómo interpretar la fertilidad en el contexto de la conservación de recursos genéticos, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Mérida, México.

**Cooper M. P.,** Vidal-Torrado P., Chaplot V. 2005. Origin of microaggregates in soils with ferrallic horizons. *Science Agriculture (Piracicaba, Braz.)* **62**:256-263.

**Coraspe-León H. M.,** Muraoka T., Ide F. V., Do Prado G. N. Nitrógeno y potasio en solución nutritiva para la producción de tuberculos-semilla de papa. 2008. *Agronomía Tropical* **58**(4):417-425.

**Cuanalo D. H.** 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo Centro de edafología. Colegio de Postgraduados. 3a edición. Chapingo, México.

**Dalzell H. W.,** Riddlestone A. J., Gray K. R. y Thurairajan K. 1991. Manejo del suelo: producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales. *Boletín de Suelos de la FAO*, No. 56.

**Day K. J.,** Hutchings M. J., y John E. A. 2003. The effects of spatial pattern of nutrient supply on the early stages of growth in plant populations. *Journal Ecology* **91**:305-315.

**Delgado R.** Castro L., Cabrera de Bisbal E., Mújica M. de J., Caniche S., Navarro L. y Noguera I. 2008. Relación entre propiedades físicas del suelo y algunas características del sistema radical del maíz cultivado en un suelo fluventic haplustoll de textura franci-rensosa de Maracay, Venezuela. *Agronomía Trop.* **58**(3):245-255.

**Diario Oficial de la Federación** 2002. Norma oficial mexicana NOM-021-SERMANAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

**Domingo S. J. M.,** Fernández de Villagrán S. J. R., Corral P.E. y Rapp A. Í. 2006. Estimación de la capacidad de retención de agua en el suelo: revisión del parámetro CRA. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* **15**(1):14-23.

**Doran J. W.** y Parkin T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. *In*: J. Doran, D. Coleman, D. Bezdicek, & B. Stewart. SSA Sp. Pub. 35, Madison.

**Dubrovsky J. G.** 1997. Determinate primary-root growth in seedlings of Sonoran Desert Cactaceae; its organization, cellular basis, and ecological significance. *Planta* **203**(1):85-92.

**Encina D. J. A. y Villareal Q. J. A.** 2002. Distribución y aspectos ecológicos del género *Quercus* (Fagaceae), el estado de Coahuila, México. *Polibotánica* **13**:1-23.

**Escamilla B. A.,** Quintal T. F., Medina L. F., Guzmán A., Pérez E. y Calvo I. L. 2005. Relaciones suelo-planta en ecosistemas naturales de la Península de Yucatán: comunidades dominadas por palmas. Caracterización y manejo de los suelos de la península de Yucatán: Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología.

**Escamilla J. A.** 1999. Estudio de los suelos y de ecosistemas vegetales. En: Orellana, R., Escamilla, J.A. y A. Larqué-Saavedra (eds.) *Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos*. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Mérida, México.

- Ewing S. A.**, Southard R. J., Macalady J. L., Hartshorn A. S. y Johnson M. J. 2007. Soil microbial fingerprints, carbon, and nitrogen in a Mojave Desert creosote-bush ecosystem. *Soil Science Society America Journal* **71**: 469-475.
- Fabio A.**, Madeira M., Steen E., Kätterer T. y Ribeiro C. 1994. Growth dynamic and spatial distribution of root mass in *Eucalyptus globulus* plantations in Portugal p 60-76 *In*: Pereira J. S., Pereira H. (Ed). *Eucalyptus for biomass production. The state of the art. Comission of the Euplean Communities.*
- Fernández N. R.**, Rodríguez J. C., Arreguín S. M. de la L. y Rodríguez J.A. 1998. Listado florístico de la cuenca del río balsas-México. *Polibotánica* **9**:1-151.
- Ferrer M.**, Durán R., Méndez M., Dorantes A. y Dzib G. 2011. Dinámica poblacional de genets y ramets de *Mammillaria gaumeri* cactácea endémica de Yucatán. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. **89**:83-105.
- Fisher S.**, Wilckens R., Vidal I., Astete P. y Maier J. 2015. Respuesta de la Achicoria (*Cichorium intybus* L.) a la aplicación de magnesio. *Chilean Journal Agricultural and Animal Sciences*. **32**(1):3-11.
- Fitter A. H.**, Strickland T. R., Harvey M. L., y Wilson G. W. 1991. Architectural analysis of plant root systems. I. Architectural correlates of exploitation efficiency. *New Phytol* **118**:375-382.
- Flores J.** y Jurado E. 2003. Are nurse-protégé interactions more common among plants from arid environments? *Journal of Vegetation Science* **14**:911-916.
- Fowler J.**, Cohen L. y Javi P. 1998. *Practical statistic for field biology.* John Wiley y Sons Chichester.
- Fujita T.** y Mizuno K. 2015. Role of nurse rocks on woody plant establishment in a South African grassland. *Tropics* **24**(2):57-64.
- Gaitán J. J.**, Augusto P. E. y Costa M. C. 2005. Fine root distribution of *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* check for this species in other resources in relation to some soil properties. *Ciencia florestal* **15**(1):33-41
- García-Mendoza A.** 2002. "Distribution of Agave (Agavaceae) in Mexico". *Cact. Succ. J.* **74**:177-187.
- García-Rubio O. R** y Malda-Barrera G. X. 2009. Conservación *in situ* y *ex situ* de *Mammillaria mathildae*, Cactaceae endémica en peligro de extincion de la ciudad de Queretaro. *Ciencia@UAQ.* **2**(1):3-16.
- Gelviz-Gelvez M. S** y Pavón H. N. P. 2013. Diversidad de especies arbustivas en una zona semiárida del centro de México. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del ambiente.*
- Gil C. R.** 2009. El comportamiento físico-funcional de los suelos, Algunos criterios para la cuantificación y diagnostico del comportamiento estructural del suelo, y su relación con la dinámica del agua y la producción de cultivos, Instituto de suelos. INTA Cautelar. Buenos Aires, Argentina.
- Gliessman S. R.** 2002. *Agroecológica: procesos ecológicos en agricultura sostenible,* LITOCAT, Turrialba, Costa Rica.
- Godínez-Álvarez H.**, Valverde T. y Ortega-Baes P. 2003. Demographic trends in the cactaceae. *The Botanical Review* **69**(2): 173–203.
- Gual-Díaz M.** y Moreno-Gutiérrez E. 2009. Especie nueva de *Heliocarpus* (Tiliaceae), de la depresión del río balsas, Guerrero, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* **80**:283-286.
- Guzmán U.**, Arias S. y Dávila P. 2003. Catálogo de cactaceas mexicanas. Ed Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México D.F.
- Havlin J. R.** Beaton J. D., Tisdale S. L y Nelson W. L. 2005. *Soil fertility and fertilizer: An introduction to nutrient management,* 7th ed. Upper Saddle River, N.J Pearson.
- Hawes M. C.**, Gunawardena U., Miyasaka S. y Zhao X. 2000. The role of root border cells in plant defense. *Trends in Plant Science* **5**:128-133.
- Haworth A. H.** 1812. *Synopsis Plantarum Succulentarum.* Richard Taylor. London.
- Hermann R. K.** 1977. Growth and production of tree roots. *In*: Marshall J. K. (ed.) *The belowground ecosystem: a synthesis of plant-associated processes.* Colorado State University, Fort Collins.

**Hernández H. M.** 2006. La vida en los desiertos mexicanos, FCE, SEP, CONACYT, CAB, Colección. La ciencia para todos 213. México D. F.

**Holdridge L. R.** 1978. Ecología basada en zonas de vida, Ed. IICA, No. 34, San José, Costa Rica.

<https://chapingo.mx/revistas/>. Página consultada 25 de octubre 2016.

**Jackson M. L.** 1982. Análisis químico de suelos. Omega. 4a. edición. Barcelona, España.

**Jarquín-Sánchez A.**, Salgado-García S., Palma-López D. J., Camacho-Chiu W. y Guerrero-Peña A. 2011. Analysis of total the nitrogen in tripical soils with near-infrared spectroscopy (NIRS) and chemometrics *Agrociencia* **45**(6):653-662.

**Jiménez S. C. L.** 2011. Las cactáceas mexicanas y los riesgos que enfrentan. Revista digital Universitaria Facultad de Ciencias de la UNAM. **12**(1):1067-6079.

**Johnson J.** 1979. Introductory soil science. A study guide and laboratory manual. Macmillan Publishing Co. New York.

**Julca-Otiniano A.**, Meneses-Florián L., Blas-Sevillano R. y Bello-Amez S. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *IDESIA* **24**(1): 49-61.

**Kaurichev A.** 1984. Prácticas de Edafología. Editorial MIR. Moscú.

**Kodandapani N.**, Cochrane M. A. y Sukumar R. 2008. A comparative analysis of spatial, temporal, and ecological characteristics of forest fires in seasonally dry tropical ecosystems in the Western Ghats, India. *Forest Ecology and Management* **256**: 607-617.

**Lal R.** 2004. Soil carbon sequestration impacts on global change & food security. *Science* **304**:1623-1627.

**Larios-Ulloa M.**; Loza-Cornejo S.; Ramos G. B. Y. y Arreola-Nava H. J. 2015. Abundancia y distribución de *Mammillaria crinita* DC. Subsp. Crinita y *Mammillaria polythele* Mart. Subsp. Polythele endémicas del cerro "La mesa redonda", Jalisco, México. *Gaia Scientia. Edição especial Cactaceae* **9**(2):54-60.

**Larios-Ulloa M.**; Loza-Cornejo S.; Ramos G.B.Y.; Arreola-Nava H.J.; Espinoza R.A.M.G. y Hernández P. L.M. 2015. Biología reproductiva de tres especies de

*Mammillaria* Haw. (Cactaceae) endémicas del cerro "La mesa redonda", Jalisco, México. *Gaia Scientia. Cactaceae* **9**(2):147-154.

**Larrea-Alcázar D. M.** y Soriano P.J. 2008. Columnar cacti-shrub relationships in an Andean semiarid valley in western Venezuela. *Plant Ecology* **196**:153-161.

**Leirana-Alcocer J.** y Parra-Tabla V. 1999. Factors affecting the distribution, abundance and seedling survival of *Mammillaria gaumeri*, an endemic cactus of coastal Yucatán, México. *Journal of Arid Environments* **41**:421-428.

**Leitón S. J. S.** 1985. Riego y drenaje, EUNED Universidad estatal a distancia, San José, Costa Rica.

**López B. R.**, Bashan Y., Bacilio M. y De la Cruz-Agüero G. 2009. Rock-colonizing plants: abundance of the endemic cactus *Mammillaria fraileana* related to rock type in the southern Sonoran Desert. *Plant Ecology* **201**:575-588.

**López C. I.**, Balochhi O. L., Laihacar M. P. 1997. Caracterización de sitios de crecimiento de seis especies pratenses nativas y naturalizadas del dominio humedo de Chile. *Agro sur* **25**(1):62-80.

**López R. P.**, Valdivia S., Sanjinés N. y De La Quintana D. 2007. The role of nurse plants in the establishment of shrub seedlings in the semi-arid subtropical Andes. *Oecologia* **152**:779-790.

**Mao Z.**, Saint-André L., Genet M., Mine Francois-Xavier, Jourdan C., Rey H., Courdaud B. y Stokes A. 2012. Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: Choosing cohesion models. *Ecological Engineering* **45**:55-69.

**Marschner P.** 2011. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3th. ed. Academic Press, San Diego, USA.

**Marshall T. J.**, Holmes J. W., Rose C. W. 1996. Soil physics. Cambridge, England. Press Syndicate of the University of Cambridge.

**Martínez-Casasnovas J. A.**, Ramos C. M. y Valles D. 2009. Análisis de la relación entre las propiedades del suelo, el índice de vigor del cultivo y el rendimiento de un viñedo de la D.O Costers del Segre (LLEIDA) eds: Montesinos S. A. y Fernández F. L. Departamento Medio Ambiente y Ciencias del Suelo Universidad de Lleida. XIII Congreso de la Asociación Española de

Teledetección. Catalayud 23-26 de septiembre de 2006. Pp 37-40.

**Martínez-Ramos M.**, Arroyo-Cosultchi G., Mandujano C. M. y Golubov J. 2016. Dinámica poblacional de *Mammillaria humboldtii* una cactácea endémica de Hidalgo. *Botanical Sciences* **94**(2):199-208.

**Martorell C.** y **Patiño P.** 2006. Globose cacti (*Mammillaria*) living on cliffs avoid high temperatures in a hot dryland of Southern México. *Journal of arid environment* **67**:541-552.

**Martorell C.** y **Peters E.** 2005. The measurement of chronic disturbance and its effects on the threatened cactus *Mammillaria pectinifera*. *Biological Conservation* **124**:197-207.

**Maschmendt D. J.** 2005. Soils and Australian viticulture. *In*: Coombe, B. G. and Dry, P. R. (eds).

**Mayz-Figueroa J.** 2004. Fijación biológica del nitrógeno. *Revista UDO Agrícola* **4**(1):1-20.

**Mendez M.**, Doranates A, Dzib G, Argaez J y Durán R. 2006. Germinación y establecimiento de plantulas de *Pterocereus gaumeri*, una Cactácea columnar, rara y endémica de Yucatán, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. **79**:33-41.

**Meza-Rangel E.**, Tafoya F., Lindig-Cisneros R., Sigala-Rodríguez J. J. y Pérez-Molphe-Balch E. 2014. Distribución actual y potencial de las Cactáceas *Ferocactus histrix*, *Mammillaria bombycina* y *M. perezdelarosa* en el estado de Aguascalientes, México. *Acta Botánica Mexicana* **108**:67-80.

**Mingorance A. M. D.** 2010. El suelo, regulador fisicoquímico de elementos traza para las plantas. Ed. CSIC, España. Pp 129-141.

**Miranda F.** 1955. Forma de vidas vegetales y el problema de la delimitación de las zonas áridas de México. *En*: Mesas redondas sobre problemas de las zonas áridas de México. Ed. IMRNR, México D.F.

**Mullins M. G.**, Bouquet A. y Williams L. E. 1992. *Biology of the grapevine*. Ed. Michael G. Mullins. Cambridge University Press: Cambridge, UK.

**Munsell.** 1975. *Soil Color Charts*. Macbeth Division of Kollmorgen Corporation. Baltimore.

**Navarro G. G.** y Navarro G. S. 2013. *Química agrícola, química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas*. Ed. Mundi-prensa. Madrid, España.

**Niering W.**, Wittaker R. y Lowe C. 1963. The saguaro: a population in relation to environment. *Science* **142**: 15-23.

**Nieves-Cordones M.**, Razzaq F. Al S. y Hervé S. 2016. Roles and transport of sodium and potassium in plants p 291-324 *In*: *The Alkali Metal Ions: Their Role for Life*. Volume 16 of the series *Metal Ions in Life Sciences*.

**Nobel P.** 1980. Morphology nurse plants and minimum apical temperatures for Young *Carnegiea gigantea*. *Botanical Gazette* **141**:188-191.

**Nobel P. S.** 1988. *Environmental Biology of Agaves and Cacti*. Cambridge University Press, Cambridge.

**Nobel P. S.** y Zutta B. R. 2005. Morphology, ecophysiology, and seedling establishment for *Fouquieria splendens* in the northwestern Sonoran Desert. *Journal of Arid Environments* **62**:251–265.

**Nobel P. S.**, Miller P. y Gram E. 1992. Influence of rocks on soil temperature, soil water potential and rooting patterns for desert succulents. *Oecologia* **92**:90-96.

**Novoplansky A.** y Goldberg D. 2001. Interaction between neighbor environments and drought resistance. *Journal of Environments* **47**: 11-32.

**Núñez M. R. M.**, Bojórquez S. J. I., Hernández J. A., Orozco B. M. G., García P. J. D., Gómez A. R., Ontiveros G. H. M. y Aguirre O. J. 2011. Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. *Biociencias* **1**(3):27-35.

**Oliveira J. A. P.** y Afif K. E. 2006. *Análisis de suelo y plantas y recomendaciones de abonado*, Ediciones Universitarias. Universidad de Oviedo. 159p.

**Olsen S. R.** y Sommers L. E. 1982. Phosphorus p 401-430 *In*: Page A. L, Miller R. H. and Keeney D. R. (Eds.) *Methods of soil analysis Part 2*. Madison: American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.

**Osuna-Ceja E. S.**, Figueroa-Sandoval B., Oleschko K., Flores-Delgadillo M. de la L., Martínez-Menes M. R. y González-Cossío F.V. 2006. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de la labranza. *Agrociencia* **40**:27-38.

- Park B. B.**, Yanai R. D., Fahey T. J. y Bailey S. W. 2008. Fine root dynamics and forest production across a calcium gradient in Northern Hardwood and Conifer ecosystems. *Ecosystems* **11**:325-341.
- Parker K. C.** 1987. Site-related demographic patterns of organ pipe cactus populations in Southern Arizona. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* **114**:149-155.
- Parker K. C.** 1989. Nurse plant relationships of columnar cacti in Arizona. *Physical Geography* **10**: 322-335.
- Peters E. M.**, Martorell C., y Escurra E. 2008. Nurse rocks are more important than nurse plants in determining the distribution and establishment of globose cacti (*Mammillaria*) in the Tehuacán Valley, México. *Journal of arid environment* **72**:593-601.
- Peters E.** y Martorell C. 2001. Conocimiento y conservación de las Mammillarias endémicas del Valle de Tehuacan-Cuicatlán. UNAM. Instituto de ecología. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. R166. México D.F.
- Peters E.**, Arizaga S., Martorell C., Zaragoza R. Y Escurra E. 2014. Distribución geográfica y estado de conservación de las poblaciones de *Mammillaria pectinifera*. *Revista Mexicana de Biodiversidad* **85**: 942-952.
- Pilbeam J.** 1999. The cactus file handbook 6 *Mammillaria*, Cirio Publishing Services Ltd, Oxford.
- Pineda-García F.**, Arredondo-Amezcuca e Ibarra-Manríquez G. 2007. Riqueza y Biodiversidad de especies leñosas del bosque tropical caducifolio El Tarimo, Cuenca del Balsas, Guerrero. *Revista Mexicana de Biodiversidad* **78**:129-139.
- Potocic N.**, Cosic T. y Pilas I. 2005. The influence of climate and soil properties on calcium nutrition and vitality of silver fir (*Abies alba* Mill.). *Environmental Pollution* **137**:596-602.
- Pritchett W. L.** 1996. Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento. Noriega: Ed. Limusa.
- Rabinowitz D.** 1981. Seven forms of rarity p 205-217 In: Syngé H. (ed.) *The biological aspects of rare plant conservation*. Wiley, New York.
- Raven P. H.**, Ray F. E. y Eichhorn S. E. 1992. *Biología de las plantas* ed. Reverte, Barcelona.
- Rending V. V** y Howard M.T. 1989. *Principles of soil-plant interrelationships* ed. Mc Graw Hill New York.
- Reyes J. I.** 1996. *Fundamentos teóricos-prácticos de temas selectos de la ciencia del suelo. Parte I.* UAM. D.F. México.
- Reyes S. J.**, Brachet I., Pérez C. y Gutiérrez de la Rosa. 2004. *Cactáceas y otras plantas nativas de la cañada de Cuicatlan-Oaxaca.* UNAM.
- Rivas R. M.** 1996. *Cactáceas y Suculentas del Jardín Botánico Lankester.* EUNED. San José: Universidad Estatal a Distancia.
- Robinson D.**, Hodge A., Griffiths B. S., y Fitter A. H. 1999. Plant root proliferation in nitrogen-rich patches confers competitive advantage. *Proceedings of the Royal Society of London* **266**:431-435.
- Rodríguez E. S.** y de la Peña. E. 2009. Interacciones planta-suelo. *Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente* **18**(2):3-3.
- Rodríguez S. J.** 1993. La fertilización de los cultivos. Un método racional. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía, Santiago, Chile.
- Rucks L.**, García F., Kaplán A., Ponce de L. J. y Hill M. 2004. *Propiedades físicas del suelo*, Facultad de agronomía, Universidad de la República, Dpto suelo y agua, Montevideo-Uruguay.
- Runsell E. J.** y Allan W. 1992. *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Runsell.* Ed. Mundiprensa, Madrid.
- Rzedowski J.** 1978. *Vegetación de México.* Limusa. México, D. F.
- Rzedowski J.** 2006. *Vegetación de México. 1ª Edición digital*, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Sánchez B.**, Ruiz M y Ríos M. 2005. *Materia orgánica y actividad biológica del suelo en relación con la altitud en la cuenca del río Maracay, estado Aragua.* *Agronomía Trop.* **55**:507-534.
- Scheinvar L.** 2004 *Flora cactológica del estado de Querétaro. Distribución y riqueza.* Fondo de Cultura Económica. CDMX.

- Scott B. I. H.** y Martín D.W. 1962. Bioelectric fields of bean roots and their relation to salt accumulation. *Australian Journal of Biological Sciences* **15**:83-100.
- Shaul O.** 2002. Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. *BioMetals* **15**:309-323.
- Shishkonova S.,** Moreno E. N., Castillo-Días V., Arellano J. y Dubrovsky J.G. 2006. Variabilidad genotípica de Cactáceas con crecimiento determinado de la raíz en la regeneración de raíces a partir de callos. *Zonas áridas* **10**:41-58.
- Siegel-Issem C. M.** 2002. Forest productivity as a function of root growth opportunity. (Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University).
- Simón M.,** Peralta N. y Costa J. L. 2013. Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *AACS. Cienc Suelo (Argentina)* **31**(1):45-55.
- Smart D.R.,** Breazeale A. y Zufferey V. 2006. Physiological changes in plant hydraulics induced by partial root removal of irrigated grapevine (*Vitis vinifera* cv. Syrah). *American Journal Enology and Viticulture*. **57** (2):201-209.
- Snyman H. A.** 2006. A greenhouse study on root dynamics of Cactus pears, *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta*. *Journal of arid Environments* **65**:529-542.
- Sparks D. L.,** y Huang P. M. 1985. Physical chemistry of soil potassium. In: Potassium in Agriculture. R. D. Munson (ed). Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- Stokes A.,** Atger C., Bengough A. G., Fourcaud T. y Sidle R. C. 2009. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and Soil* **324**:1-30.
- Sudzuki F.,** 1995. Anatomy and morphology. In: Barbera, G., Inglese, P., Pimienta Barrios, E. (Eds.), *Agro-ecology, Cultivation and Uses of Cactus Pear*. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132, Roma, Italy.
- Ureta C.** y Martorell C. 2001. Identifying the impacts of chronic anthropogenic disturbance on two threatened cacti to provide guidelines for population-dynamics restoration. *Biological Conservation* **142**:1992-2001.
- Valderrama C. L.** 2008. Concentración de minerales de titanio contenidos en las arenas de playas de la región de Atacama-Chile. *Holos, Año* **24**(1):119-130
- Valdez-Manzanares A. E.** 2009. Distribución y consumo de semillas de cactáceas en el desierto costero de Topolobampo. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Sinaloa. Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México.
- Valiente-Banuet A.** y Ezcurra E. 1991. Shade as a cause of the association between the cactus *Neobuxbaumia tetetzo* and the nurse plant *Mimosa luisiana* in the Tehuacan Valley, México. *Journal of Ecology* **79**:961-971.
- Valles S. C.** (Ed). 1997. *Suculentas Mexicanas: Cactaceas*, CVS Publicaciones: Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad, coeditado con: la Secretaria del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Autónoma Metropolitana.
- Valverde P. L.** y Zavala-Hurtado J. A. 2006. Assessing the ecological status of *Mammillaria pectinifera* Weber (Cactaceae), a rare and threatened species endemic of the Tehuacán-Cuicatlán Región in Central México. *Journal of Arid Environments* **64**:193-208.
- Valverde P. L.,** Zavala-Hurtado J. A., Jiménez-Sierra C., Rendón-Aguilar B., Cornejo-Romero A., Rivas-Arancibia S., López-Ortega G. y Pérez-Hernández M. A. 2009. Evaluación del riesgo de extinción de *Mammillaria pectinifera*, cactácea endémica de la región de Tehuacán-Cuicatlán. *Revista Mexicana de Biodiversidad* **80**:219-230.
- Valverde T.,** Quijas S., Lopez-Villavicencio, M., Castillo, S., 2004. Population dynamics of *Mammillaria magnimamma* Haworth (Cactaceae) in a lava-field in central Mexico. *Plant Ecology* **170**:167-184.
- Vaz C. M. P.,** Bassoi L. H. y Hopmans J. W. 2001. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. *Soil & Tillage Research* **60**:35-42.
- Vázquez-Sánchez M.,** Terrazas T. y Arias S. 2012. El hábito y la forma de crecimiento en la Tribu Cactaceae (Cactaceae, Cactoideae). *Botanical Sciences* **90**(2):97-108

**Villagra P. E.**, Giordano C., Álvarez J. A., Cavagnaro J. B., Guevara., Sartor C. y Passera C. B. 2011. Ser planta en el desierto: estrategias de uso de agua y resistencia al estrés hídrico en el Monte central de Argentina. *Ecología Austral* **21**:29-42.

**Villaseñor G. L. E.** (Ed). 2005. La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

**Villaseñor J. L.** 2003. Diversidad y distribución de las magnoliophyta de México. *Interciencia*, vol. 28.

**Wahl S.**, Ryser P., Edwards P. J. 2001. Phenotypic plasticity of grass root anatomy in response to light intensity and nutrient supply. *Annals of Botany* **88**: 1078-2001.

**Warren-Rhodes K. A.**, Rhodes K. L., Pointing S. B., Ewing S. A., Lacap D. C., Gómez-Silvia B., Amundson R. Friedmann E. I. y McKay C. P. 2006. *Microbial Ecology* **52**:389-398.

**Wijesinghe D. K.**, Jonh E. A., Beurskens S., Hutchings M. J. 2001. Root system size and precision in nutrient foraging responses to spatial pattern of nutrient supply in six herbaceous species. *Journal of Ecology* **89**:972-983.

**Wilson S. D.** 2000. Heterogeneity, diversity and scale in plant communities. *The Ecological Consequences of Environmental* (eds.) Hutchings M. J., John E. A. y Stewart A. J. A. Blackwell Science, Oxford.

**WRB**, IUSS Grupo de Trabajo. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos* No. 103. FAO, Roma.

**Zérega M. L.**, Hernández A. T. y Valladares G. J. 1997. Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno y fuentes de magnesio sobre el suelo y el cultivo de caña de azúcar. *Bioagro* **9**(2):43:51.