



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES IZTACALA

"RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES
FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO Y LA
DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DE LAS COSTRAS
BIOLÓGICAS EN LAS TERRAZAS ALUVIALES DEL
VALLE DE ZAPOTITLÁN SALINAS, MÉXICO."

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

P R E S E N T A

MENDOZA OROZCO LUCIA MARLETH

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. HÉCTOR OCTAVIO GODÍNEZ
ÁLVAREZ

COMITÉ TUTOR: DR. VÍCTOR RIVERA AGUILAR Y DR. LEOPOLDO
GALICÍA SARMIENTO

MÉXICO, D.F.

JUNIO, 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES IZTACALA

"RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES
FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO Y LA
DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DE LAS COSTRAS
BIOLÓGICAS EN LAS TERRAZAS ALUVIALES DEL
VALLE DE ZAPOTITLÁN SALINAS, MÉXICO."

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

P R E S E N T A

MENDOZA OROZCO LUCIA MARLETH

**TUTOR PRINCIPAL DE TESIS: DR. HÉCTOR OCTAVIO GODÍNEZ
ÁLVAREZ**

**COMITÉ TUTOR: DR. VÍCTOR RIVERA AGUILAR Y DR. LEOPOLDO
GALICÍA SARMIENTO**

MÉXICO, D.F.

JUNIO, 2012



Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 20 de febrero de 2012, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** del (la) alumno (a) **MENDOZA OROZCO LUCÍA MARLETH** con número de cuenta 401054321 con la tesis titulada **"RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO Y LA DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DE LAS COSTRAS BIOLÓGICAS EN LAS TERRAZAS ALUVIALES DEL VALLE DE ZAPOTITLÁN SALINAS, MÉXICO."** realizada bajo la dirección del (la) **DR. HÉCTOR OCTAVIO GODÍNEZ ÁLVAREZ:**

Presidente: DR. RAFAEL LIRA SAADE
Vocal: DRA. CHRISTINA DÉSIRÉE SIEBE GRABACH
Secretario: DR. VICTOR MANUEL RIVERA AGUILAR
Suplente: DRA. SALA LUCÍA CAMARGO RICALDE
Suplente: DR. HOMERO JULIO EUDES CAMPO ALVES

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 27 de abril 2012.

M. del Coro Arizmendi

DRA. MARÍA DEL CORO ARIZMENDI ARRIAGA
COORDINADORA DEL PROGRAMA

c.c.p. Expediente del (la) interesado (a)

AGRADECIMIENTOS

- Al Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM.
- Al apoyo recibido de la beca CONACYT, con número de becario: 239946 y CVU: 347987.
- A mi tutor principal Héctor Octavio Godínez Álvarez, ya que el presente trabajo de tesis fue realizado gracias a su apoyo económico.
- A los miembros del Comité Tutor; Víctor Rivera Aguilar y Leopoldo Galicia Sarmiento. Así como a los miembros del jurado; Dra. Sara Lucía Camargo Ricalde, Dra. Christina Siebe Grabach, Dr. Julio Eudes Campo Alves y Dr. Rafael Lira Saade.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

- Al gran equipo de trabajo que me ayudó en campo, Meztli Olvera, Aslam Narvaez y Paulino Velarde, gracias por su disposición, compañía y sobre todo a su amistad, así como a los buenos comentarios para mejorar el muestreo de las costras.
- A Juanita Gaspar, por estar siempre conmigo y mas por tu gran amistad.
- A Lizeth Zerna, Marisol Ramos, Martha Santiago, Rafael Bibriesca, Jaime Camacho y Gabriel López, gracias por los buenos y malos momentos que pasamos en clases y fuera de ellas por supuesto.
- A Gina de posgrado, por su tiempo y disposición para atenderme fuera de horario.

DEDICATORIA

A mi padre Salomón Mendoza Ruiz, por su apoyo y amor incondicional.

A mi tutor de tesis Héctor Godínez Álvarez, sin su paciencia, disposición, compromiso y entusiasmo, este proyecto no hubiera sido posible.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	5
2.1 Objetivo general	5
2.2 Objetivos particulares	5
3. MATERIALES Y MÉTODOS	6
3.1 Área de estudio	6
3.2 Muestreo de las costras biológicas	9
3.3 Análisis del suelo	10
3.4 Análisis estadístico	11
4. RESULTADOS	13
4.1 Composición de las costras biológicas y curvas de acumulación	13
4.2 Riqueza específica	19
4.3 Similitud	21
4.4 Cobertura	22
4.5 Propiedades del suelo y variables ambientales	25
4.6 Relación entre las propiedades del suelo, las variables ambientales y las costras biológicas	30
5. DISCUSIÓN	40
5.1 Composición de las costras biológicas	40
5.2 Relación entre las propiedades del suelo, las variables ambientales y las costras biológicas	43
6. CONCLUSIONES	47
7. BIBLIOGRAFÍA	48
8. APÉNDICES	55

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Corte tridimensional de la capa superficial del suelo a 3 cm de profundidad, donde se muestran los principales organismos que conforman las costras biológicas (Modificado a partir de Belnap y Lange 2003). 1
- Figura 2.** Imagen satelital de un mezquital cerrado, un mezquital abierto y un campo de cultivo, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México. 7
- Figura 3.** Número de especies de cianobacterias, musgos y líquenes observadas (línea continua y calculadas con el estimador Jackknife 1 (línea discontinua) en el mezquital cerrado (a), el mezquital abierto (b) y el campo de cultivo (c) del sitio con suelo de textura fina, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México 17
- Figura 4.** Número de especies de cianobacterias, musgos y líquenes observadas (línea continua) y calculadas con el estimador Jackknife 1 (línea discontinua) en el mezquital cerrado (a), el mezquital abierto (b) y el campo de cultivo (c) del sitio con suelo de textura gruesa, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México 18
- Figura 5.** Número de especies observadas (línea continua) e intervalo de confianza del 95% (línea discontinua) en tres tipos de cobertura vegetal ubicados en sitios con suelo de textura fina (a) y suelo de textura gruesa (b), en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México 20
- Figura 6.** Cobertura de cianobacterias, musgos y líquenes en tres tipos de vegetación ubicados en sitios con suelo de textura fina (a) y textura gruesa (b) en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México. Las distintas letras en las columnas, indican diferencias significativas 24
- Figura 7.** Contenido de arcilla, limo y arena en tres tipos de cobertura vegetal reportados en un suelo de textura fina (a) y textura gruesa (b), en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México. Las distintas letras en las columnas, indican diferencias significativas 27
- Figura 8.** . Rango promedio de la cobertura de rocas, cobertura de hojarasca y cobertura del dosel, en tres tipos de cobertura vegetal ubicados en sitios con suelo de textura fina (a) y gruesa (b), en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México. En cada tipo de cobertura vegetal, las columnas señaladas con distintas letras, indican diferencias significativas 29
- Figura 9.** Árbol de regresión multivariada entre las propiedades del suelo, variables ambientales, y la cobertura de cianobacterias y líquenes en un sitio con suelo de textura fina, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México. Se muestra la variable más importante, el tipo de cobertura vegetal, mezquital cerrado (MC), mezquital abierto (MA) y campo de cultivo (CC) y su relación con otras variables 36
- Figura 10.** Árbol de regresión multivariada entre las propiedades del suelo, variables ambientales, y la cobertura de cianobacterias y líquenes en un sitio con suelo de textura gruesa, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México 37
- Figura 11.** Árbol de regresión multivariada entre las propiedades del suelo, variables ambientales, y la presencia/ausencia de las especies en un sitio con suelo de textura fina, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México 38

Figura 12. Árbol de regresión multivariada entre las propiedades del suelo, variables ambientales, y la presencia/ausencia de las especies en un sitio con suelo de textura gruesa, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México..... 39

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ubicación de los sitios de muestreo, donde se determinó la relación de las propiedades físicoquímicas del suelo sobre la distribución y abundancia de las costras biológicas en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México. (n= 16 en cada uno de los seis sitios muestreados)	9
Cuadro 2. Listado de especies de cianobacterias, musgos y líquenes registrados en costras biológicas colectadas en seis sitios con distinto tipo de textura de suelo y cobertura vegetal, dentro de las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México	14
Cuadro 3. Índices de similitud de Jaccard entre las costras biológicas del mezquital cerrado, el mezquital abierto y el campo de cultivo en el suelo de textura fina (a) y el suelo de textura gruesa (b) de las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México	22
Cuadro 4. Promedio (\pm error estándar) de las propiedades físicoquímicas del suelo en tres tipos de cobertura vegetal, ubicados en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México	28
Cuadro 5. Porcentaje de varianza explicado por el árbol de regresión multivariada entre las propiedades del suelo, variables ambientales, y la cobertura de cianobacterias y líquenes en sitios con suelo de textura fina (a) y gruesa (b), en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México	33
Cuadro 6. Porcentaje de varianza explicado por el árbol de regresión multivariada entre las propiedades del suelo, variables ambientales, y la presencia de las especies en sitios con suelo de textura fina (a) y gruesa (b), en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.....	34

RESUMEN

Las costras biológicas del suelo son comunidades de cianobacterias, algas, micromicetos, líquenes y briofitas, las cuales crecen sobre la superficie del suelo. Están distribuidas ampliamente en regiones áridas y semiáridas, en donde generalmente cubren áreas no ocupadas por las plantas vasculares, son consideradas indicadores del funcionamiento de los ecosistemas, ya que se ha sugerido que podrían contribuir a detectar áreas con problemas de desertificación. Sin embargo, para poder utilizarlas como indicadores es necesario conocer los factores físicos, químicos y biológicos que afectan su distribución y abundancia. En el Valle de Zapotitlán Salinas, México están presentes en distintos sitios como selvas bajas, matorrales, salineras y campos de cultivo, en donde su distribución está limitada por la densidad aparente del suelo. En el presente trabajo, se determinó la relación entre las propiedades físicoquímicas del suelo y la distribución y abundancia de las costras biológicas. Se describió la riqueza y abundancia de las costras existentes en dos terrazas aluviales con suelos de distinta textura y cobertura vegetal, se evaluaron algunas variables ambientales como el porcentaje de cobertura del dosel, hojarasca y rocas. Se cuantificó para el suelo, la textura (% de arcillas, limos y arenas), el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de CaCO_3 y, por último, las concentraciones de Mg, Mn, K, P y Zn. Los resultados obtenidos mostraron que las comunidades de costras biológicas estuvieron conformadas por 5 especies de cianobacterias, 8 de musgos y 16 de líquenes. Las costras biológicas presentaron una mayor riqueza y abundancia de especies en las terrazas aluviales con suelos de textura gruesa y en los mezquiales abiertos. La relación entre la cobertura de las cianobacterias y los líquenes con las propiedades del suelo y las variables ambientales varió dependiendo de la textura del suelo. En el suelo de textura fina, la variable más importante fue el tipo de cobertura vegetal, mientras que en el suelo de textura gruesa fue el contenido de arcilla. La relación entre la presencia de las especies de las costras con las propiedades del suelo y las variables ambientales también varió dependiendo de la textura del suelo. En el suelo de textura fina, la variable más importante fue el tipo de cobertura vegetal, mientras que en el suelo de textura gruesa fue el contenido de CaCO_3 .

Palabras clave: costra biológica, distribución, abundancia, terrazas aluviales, cobertura vegetal, textura del suelo.

ABSTRACT

Biological soil crusts are communities of cyanobacteria, algae, micromicetos, lichens and bryophytes, which grow on the soil surface. They are widely distributed in arid and semiarid regions where, generally, cover areas not occupied by vascular plants are considered indicators of ecosystem functioning. It has been suggested that this could help identify problem areas of desertification. However, to use them as indicators, it is necessary to know the physical, chemical and biological processes affecting their distribution and abundance. In the Salinas Valley Zapotitlan, Mexico, they are present in different sites such as lowland forests, thickets, salt mines and fields, where its distribution is limited by soil bulk density. In this study, we investigated the relationship between soil physicochemical properties and the distribution and abundance of biological crusts. This study also describes the wealth and abundance of existing biological crusts in two alluvial terraces with soils of different texture and vegetation cover and some environmental properties were evaluated as the percentage of canopy cover, the litter and rock. We measured soil physical properties such as texture (% clay, silt and sand) and soil chemical properties such as pH, electrical conductivity, CaCO₃ content and, finally, the concentrations of Mg, Mn, K, P and Zn. The results showed that communities of biological crusts were formed by 5 species of cyanobacteria, 8 mosses and 16 lichens. Biological crusts had a higher species richness and abundance in the alluvial terraces with coarse-textured soils and had a higher species richness and abundance in open mesquite. The relationship between the coverage of cyanobacteria and lichens with soil properties and environmental variables differed depending on soil texture. In fine-textured soil, the most important variable was the type of vegetation, while the coarse-textured soil was clay content. The relationship between the presence of cobalt species on the soil properties and environmental variables also varied depending on soil texture. In fine-textured soil, the most important variable was the type of vegetation, while in the coarse-textured soil was the content of CaCO₃.

Keywords: biological crust, distribution, abundance, alluvial terraces, vegetation cover, soil texture.

1. INTRODUCCIÓN

Las costras biológicas del suelo son comunidades de cianobacterias, algas, micromicetos, líquenes y briofitas, las cuales crecen sobre la superficie del suelo (Belnap *et al.* 2003a) (Fig. 1). Estas comunidades de microorganismos pueden clasificarse según su morfología (costras hipermorfas, perimorfas y criptomorfas) y topografía (costras lisas, rugosas, paniculadas y onduladas) (Apéndice 1). Están distribuidas ampliamente en las regiones áridas y semiáridas del mundo, en donde generalmente cubren áreas no ocupadas por las plantas vasculares (Belnap *et al.* 2003a).

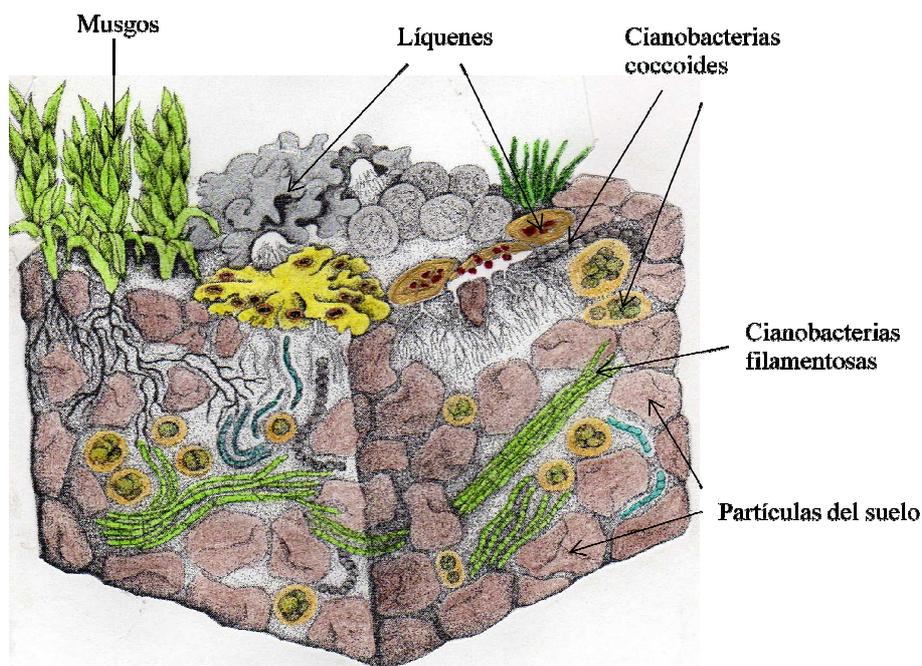


Figura 1. Corte tridimensional de la capa superficial del suelo a 3 cm de profundidad, donde se muestran los principales organismos que conforman las costras biológicas (Modificado a partir de Belnap y Lange 2003).

Las costras tienen un papel importante en los ciclos biogeoquímicos debido a que son elementos dominantes capaces de realizar la fotosíntesis y fijar el nitrógeno (N) atmosférico (Belnap *et al.* 2003 y Bowker *et al.* 2005). La fijación del N por las cianobacterias de las costras es un aspecto fundamental, pues está comprobado que este nutriente es un factor limitante del crecimiento vegetal (Curtis 2000). La presencia de costras en las zonas áridas contribuye a incrementar la estabilidad y fertilidad del suelo, facilitando el establecimiento de las plantas (Bowker *et al.* 2006a, b y Chen *et al.* 2007).

Las costras biológicas son consideradas indicadores del funcionamiento de los ecosistemas, ya que se ha mencionado que podrían contribuir a detectar áreas con problemas de desertificación (Bowker *et al.* 2008, 2010b y Maestre *et al.* 2010). Sin embargo, para poder utilizarlas como indicadores es necesario conocer los factores físicos, químicos y biológicos que afectan su distribución y abundancia. Con respecto a los factores físicos, se ha sugerido a la textura del suelo, ya que se ha reportado que las costras se desarrollan mejor en suelos de textura fina, así mismo, se ha correlacionado positivamente el contenido de arcilla con la cobertura de las costras (Belnap y Lange 2003). En el caso de los factores químicos, se ha propuesto que el contenido de algunos nutrientes como el fósforo (P), el potasio (K), el magnesio (Mg), el manganeso (Mn) y el zinc (Zn), pueden influir en la presencia de las costras (Bowker *et al.* 2005), debido a que la composición de especies puede depender de la disponibilidad de algunos nutrientes (Bowker *et al.* 2006a). Se ha reportado que el Mn y el Zn son factores que limitan el crecimiento de las costras, ya que su disponibilidad incrementa su cobertura (Harper y Belnap 2001, Bowker *et al.* 2005 y Bowker *et al.* 2006a). La presencia de carbonatos también es importante, debido a que pueden inmovilizar nutrientes como el P y Mn, entre otros (Bowker *et al.* 2005, 2006a, b), por otro

lado, se ha sugerido que algunas especies de líquenes que componen las costras, son indicadores de suelos con altos y bajos niveles de carbonatos de calcio (CaCO_3) (Belnap y Lange 2003). Con respecto a los factores biológicos, la cobertura del dosel, proporcionada por algunas comunidades de plantas, puede influir en cambios ambientales a pequeña escala y determinar el patrón espacial de los grupos que conforman las costras (Castillo-Monroy y Maestre 2011). Los líquenes y musgos en la mayoría de las comunidades son diferentes en función de las plantas vasculares presentes y los mecanismos de competencia y facilitación varían. Estos organismos crecen debajo del dosel, en donde se amortiguan del clima (Bowker *et al.* 2010a). Además, las costras necesitan de humedad, en el caso particular de los musgos estos requieren de agua para su reproducción (Delgadillo y Cárdenas 1990), por lo que presentan un óptimo desarrollo bajo esta condición (Eldridge y Tozer 1997, Belnap y Lange 2003). Otro factor a considerar, es la presencia de hojarasca proporcionada por las plantas que crecen cerca de las costras, ya que se ha reportado una correlación positiva entre un bajo nivel de hojarasca y una alta cobertura de las costras (Read *et al.* 2008). Por otro lado, la presencia de rocas sobre las costras, podrían estar afectando procesos como el intercambio de gases y la fotosíntesis (Belnap y Lange 2003). El tipo de manejo de suelo, es otro factor que puede afectar la distribución y abundancia de las costras, ya que las costras son vulnerables al pastoreo, la agricultura, el fuego y el pisoteo ocasionado por las actividades humanas (Wakes y Flechtner 2002). La pérdida de las costras en sitios fragmentados o en tierras de cultivo puede afectar negativamente las funciones del ecosistema, debido a que se incrementa la erosión del suelo y se disminuye la infiltración del agua y la fijación atmosférica del N (Read *et al.* 2008).

En la reserva de la biosfera del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, particularmente en el Valle de Zapotitlán Salinas, existen costras biológicas conformadas por siete especies de cianobacterias, diecinueve especies de musgos y ocho especies de líquenes (Rivera-Aguilar *et al.* 2006). Estas costras están presentes en distintas coberturas como selvas bajas, matorrales, salineras y campos de cultivo, en donde su distribución está aparentemente determinada por una densidad aparente del suelo alta (1.2 g cm^{-3}) (Rivera-Aguilar *et al.* 2009). La formación existente hasta el momento respecto a estas comunidades muestra que las costras afectan la germinación y el crecimiento de las plántulas de distintas especies de plantas vasculares (Rivera-Aguilar *et al.* 2005, Godínez-Álvarez *et al.* 2012). Las costras son particularmente abundantes en las terrazas aluviales ubicadas en las partes bajas del valle (Muñoz 2008). Las terrazas tienen suelos de texturas contrastantes (p. ejem. arenosos, arcillosos) y varían con la cobertura de la vegetación (p. ejem. mezquital cerrado, mezquital abierto) debido a las actividades humanas que se han realizado en ellas como la agricultura, la extracción de leña y la producción de sal (Fig. 2). En este sentido, es importante determinar si existe alguna relación entre las propiedades físicas y químicas del suelo, y la distribución y abundancia de las costras. Además, es importante analizar si la relación entre las propiedades del suelo y la costra biológica varía en función de la cobertura de la vegetación.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la distribución y abundancia de las costras biológicas en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

2.2 Objetivos Particulares

- Describir la riqueza y abundancia de las costras biológicas existentes en dos terrazas aluviales con suelos de distinta textura y vegetación con distinta cobertura.
- Cuantificar algunas propiedades ambientales como el porcentaje de cobertura del dosel, el porcentaje de cobertura de hojarasca y el porcentaje de cobertura de rocas.
- Cuantificar algunas propiedades físicas del suelo como la textura (contenido de arcillas, limos y arenas).
- Cuantificar algunas propiedades químicas del suelo como el pH, la conductividad eléctrica, la concentración de CaCO_3 , así como la disponibilidad de P, K, Mg, Mn, y Zn.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El Valle de Zapotitlán de las Salinas, situado en el estado de Puebla, México, forma parte del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, está ubicado a 18° 20' N y 97° 28' O, a una altitud promedio de 1550 msnm. El clima es de tipo seco semi-cálido, con una temperatura media anual de 21°C y la precipitación promedio anual es de 420 mm (Muñoz 2008). Debido a la gran variedad de tipos de suelo y unidades geomorfológicas, el valle está cubierto por distintas asociaciones vegetales. Una de estas unidades geomorfológicas son las terrazas aluviales, las cuales se localizan en la parte media de la cuenca del valle, a una altitud promedio de 1480 msnm (Muñoz-Iniestra *et al.* 2009). Es una unidad dominada por formas de erosión y depositación fluvial. Las terrazas pueden ser continuas o discontinuas y los suelos desarrollados presentan variaciones en textura, profundidad y contenido de materia orgánica (Muñoz 2008). Se pueden encontrar recubrimientos de arcilla, limo y materia orgánica formados por material dispersado en las partes altas del valle y movilizado hacia las partes bajas. Pueden presentar problemas de salinidad en algunos sitios, dependiendo del clima, tipo de suelo y edad. La vegetación dominante corresponde a mezquitales y selva baja de *Prosopis laevigata* (Humb.& Bonpl. ex Willd.) M. C. Johnst. y *Parkinsonia praecox* (Ruiz. & Pav. Ex Hook.) Hawkins. Además existen otras especies dominantes como *Myrtillocactus geometrizans* (C. Mart.) Console, *Castela tortuosa* Liebm., *Opuntia puberula* Pfeiffer y *Stenocereus stellatus* (Pfeiff.) Riccob (Osorio *et al.* 1996 y Valiente-Banuet *et al.* 2000) (Fig. 2). Actualmente el estado de las terrazas varía entre conservadas y deterioradas, debido a las diferentes actividades humanas que se presentan en estos sitios (UBIPRO 2003).



Figura 2. Imagen satelital de un mezquital cerrado, un mezquital abierto y un campo de cultivo, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

3.2 Trabajo de campo

El diseño experimental que se utilizó para evaluar la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y las costras biológicas consideró dos factores, el tipo de suelo y el tipo de cobertura vegetal. El tipo de suelo presentó dos niveles: 1) suelo de textura gruesa y 2) suelo de textura fina a media. Debido a la variación espacial del suelo, es importante mencionar que estos niveles incluyen diferentes clases texturales. Los suelos de textura gruesa incluyen las clases texturales franca, franca-arenosa, franca-arcillosa y franca-arcillosa-arenosa. Los suelos de textura fina a media incluyen las clases texturales arcilla, arcilla-limosa, franca, franca-limosa, franca-arcillosa-limosa (Apéndice 2). A pesar de esta variación, en este trabajo se decidió usar los términos suelo de textura gruesa y suelo de textura fina. El tipo de cobertura vegetal constó de tres niveles: 1) mezquital cerrado (Riqueza específica: 12-18 especies/20 cm²; cobertura de dosel: 69-95%), 2) mezquital abierto (Riqueza específica: 2-11 especies/20 cm²; cobertura de dosel: 22-70%), y 3) campo de cultivo (Riqueza específica: 1-5 especies/20 cm²; 10-30% cobertura de dosel) para un total de 6 sitios de muestreo (Fig. 2, Cuadro 1).

Cuadro 1. Ubicación de los sitios de muestreo, donde se determinó la relación de las propiedades fisicoquímicas del suelo sobre la distribución y abundancia de las costras biológicas en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México. (n= 16 en cada uno de los seis sitios muestreados).

	Mezquital cerrado	Cobertura vegetal	
		Mezquital abierto	Campo de cultivo
Textura fina	Longitud 97° 27' 18" O	Longitud 97° 27' 39" O	Longitud 97° 27' 39" O
	Latitud 18° 19' 39" N	Latitud 18° 19' 41" N	Latitud 18° 19' 41" N
Suelo	1438 msnm	1442 msnm	1446 msnm
	Textura gruesa	Longitud 97° 29' 29" O	Longitud 97° 29' 33" O
	Latitud 18° 19' 05" N	Latitud 18° 19' 00" N	Latitud 18° 18' 56" N
	1477 msnm	1489 msnm	1494 msnm

3.3 Muestreo de las costras biológicas

En cada sitio se ubicaron aleatoriamente 3 líneas de 30 m de largo, las cuales estuvieron separadas entre sí por una distancia de 10 m. Dentro de cada línea, se localizaron 16 puntos al azar, los cuales fueron utilizados para ubicar las costras biológicas más cercanas (8 en espacios abiertos y 8 debajo de arbustos). Las costras fueron muestreadas alternadamente y sólo se trabajó con las costras que se encontraron del lado izquierdo de la línea, para evitar pisarlas y dañarlas. Una vez ubicada la costra, se colocó un cuadrante de 400 cm² (20 x 20 cm) sobre el suelo para cuantificar el porcentaje de la cobertura de hojarasca, el porcentaje de cobertura de las rocas y el porcentaje de cobertura del dosel que estaban directamente sobre la costra. El porcentaje se determinó utilizando la siguiente escala: 1) <25%, 2) 25-50%, 3) 50-75% y 4) > 75%. Posteriormente, se quitó el cuadrante y la costra existente

dentro del área se limpió de hojarasca y rocas con una brocha fina. La costra se humedeció con agua, para facilitar la identificación de los grupos que la conformaban. Los musgos y líquenes fueron identificados en campo. Sin embargo, en algunas ocasiones se tomaron muestras para la determinación de las especies en laboratorio. La identificación de las cianobacterias se realizó en el laboratorio para lo cual, se tomaron 5 muestras de 2.5 cm de diámetro con una pala, en las esquinas y el centro del cuadrante. Los tres grupos fueron determinados hasta especie, utilizando claves especializadas (Musgos: Zander 1979, Cárdenas y Delgadillo 2009; Líquenes: Nash 1975; Cianobacterias: Komarék y Anagnostidis 1989), o morfoespecies utilizando características morfológicas como forma, color, tamaño y textura. Con esta información se realizó un listado de las especies de cianobacterias, musgos y líquenes presentes en las costras biológicas. Después del inventario de las especies y de la toma de muestras, se colocó un acetato de vinilo sobre el cuadrante para delinear el contorno de: 1) toda la costra, 2) las cianobacterias, 3) los musgos, y 4) los líquenes. En cada caso, se utilizó un acetato distinto. Los acetatos fueron fijados con clavos en los cuatro extremos del cuadrante. En el laboratorio, se colocó una cuadrícula de 20 x 20 cm, dividida en cuadros de 1 cm², sobre cada acetato para contar el número de cuadros ocupados y calcular la cobertura de toda la costra y de cada uno de los grupos.

3.4 Análisis del suelo

El muestreo del suelo se realizó después del muestreo de la costra. Para esto, se retiró la costra de la superficie del suelo con una pala de jardinero y se tomaron 6-12 (variación debido al tipo de textura del suelo) muestras de suelo de 5 cm de diámetro y 3 cm de profundidad (medida a la cual se encuentran asociados los organismos que conforman a las

costras y a la cual estos se relaciona con las propiedades fisicoquímicas del suelo). Las muestras fueron tomadas en las esquinas y en el centro del cuadrante con un tubo de PVC, posteriormente fueron tamizadas con una malla de 2 mm y mezcladas para obtener una muestra compuesta de 300 g. La costra biológica se volvió a colocar en el mismo sitio, para causar el menor impacto posible. Se tomaron un total de 96 muestras, las cuales fueron colocadas en bolsas de plástico etiquetadas. Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Fertilidad de Suelos, del Instituto de Recursos Naturales, del Colegio de Postgraduados, para realizar los análisis de textura (% de arcillas, limo y arena) por el método de Bouyoucus, de conductividad eléctrica (CE) (medido con puente de conductividad en extracto de suelo: agua destilada, relación 1:5), de pH (con potenciómetro en una suspensión de suelo: agua destilada, relación 1:2), de carbonato de calcio (CaCO_3) (porcentaje medido con el método de Daeva), la disponibilidad de magnesio (Mg), potasio (K) (extraídos con NH_4OAc 1N y cuantificados con espectrofotometría de absorción atómica y flamometría, respectivamente), fósforo (P) (método Olsen), manganeso (Mn) y zinc (Zn) (extraídos con DTPA y cuantificados con espectrofotometría de absorción atómica).

3.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó para contestar las siguientes preguntas: 1) ¿cuáles son las especies que conforman las costras? y ¿qué tan completo fue el muestreo para conocer dichas especies?, 2) ¿el número de especies (riqueza específica) que conforman las costras es diferente entre los tipos de cobertura vegetal, dentro de cada tipo de suelo?, 3) ¿qué tan similares son las especies que conforman las costras entre los tipos de cobertura vegetal, dentro de cada tipo de suelo?, 4) ¿la cobertura de las costras es diferente entre los tipos de

cobertura vegetal? y 5) ¿existe alguna relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y las variables ambientales con la presencia de las especies y la cobertura de las costras?

Para responder la primera pregunta se calculó la riqueza acumulada para cada sitio de muestreo con el estimador Jackknife 1. Este estimador permite obtener curvas de acumulación de especies y conocer la proporción de especies colectadas con respecto a un total esperado (Colwell 2000). Para la segunda pregunta, se usaron los valores de especies observados y los calculados con el estadístico Mao Tau, así como los límites superior e inferior del intervalo de confianza al 95%. Todos los cálculos para contestar estas dos preguntas fueron realizados con el programa EstimateS Win 8.20 (Colwell 2000). Para la tercera pregunta se calculó el índice de Jaccard (Moreno 2001), el cual permite conocer la similitud de especies entre los sitios de muestreo. La cuarta pregunta se respondió comparando la cobertura de los musgos, líquenes y cianobacterias con un ANOVA de una vía. Por último, para responder la quinta pregunta se compararon las propiedades fisicoquímicas del suelo mediante un MANOVA y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey o Dunnett, dependiendo de la homogeneidad de la varianza. Las variables ambientales (porcentaje de cobertura de la hojarasca, porcentaje de cobertura de las rocas y porcentaje de cobertura del dosel) se compararon mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Además, se realizaron árboles de regresión multivariada (De' ath, 2002) considerando las variables del suelo y las variables ambientales como variables independientes, y la presencia de las especies, así como la cobertura de las cianobacterias y los líquenes como variables dependientes. Para la presencia de las especies, sólo se consideraron las especies que estuvieron presentes en más de 10 muestras. La cobertura de

los musgos no se consideró en este análisis debido a que en la mayoría de las muestras presentó valores de cero. Los árboles de regresión seleccionados fueron aquellos que presentaron el menor tamaño posible y explicaron el mayor porcentaje de varianza.

4. RESULTADOS

4.1 Composición de las costras biológicas y curvas de acumulación

Las comunidades de costras biológicas muestreadas en los seis sitios están conformadas por un total de veintinueve especies, de las cuales cinco son cianobacterias, ocho musgos y dieciséis líquenes (Cuadro 2). Las especies de cianobacterias más comunes fueron *Chroococcidiopsis sp.*, *Microcoleus paludosus*, y *Scytonema javanicum*. Los musgos más comunes fueron *Bryum argenteum* y *Pseudocrossidium replicatum*, mientras que los líquenes fueron *Collema coccophorum* y *Endocarpon pallidum*. Todas estas especies se registraron en 5 a 6 de los sitios muestreados.

Cuadro 2. Listado de especies de cianobacterias, musgos y líquenes registrados en costras biológicas colectadas en seis sitios con distinto tipo de textura de suelo y cobertura vegetal, dentro de las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

Especies	Suelo de textura fina			Suelo de textura gruesa		
	Mezquital cerrado	Mezquital abierto	Campo de cultivo	Mezquital cerrado	Mezquital abierto	Campo de cultivo
Cianobacterias						
<i>Chroococidiopsis</i> sp.	X	X	X	X	X	X
<i>Microcoleus paludosus</i> (Kutz.) Gomont	X	X	X	X	X	X
<i>Nostoc</i> sp.	X			X	X	
<i>Schizothrix friesii</i> (Ag.) Gomont	X			X	X	X
<i>Scytonema javanicum</i> Bornet	X	X	X	X	X	X
Musgos						
<i>Aloina hamulus</i> (C. Muell.)Broth		X		X	X	
<i>Bryum argenteum</i> Hedw.	X	X		X	X	X
<i>Dydimodon</i> sp.					X	
<i>Pseudocrossidium replicatum</i> (Tayl.) Zand.	X	X		X	X	X
<i>Pseudocrossidium aureum</i> (Bartr.) Zand.				X	X	
<i>Musgo 1</i>				X	X	
<i>Musgo 2</i>		X		X	X	
<i>Musgo 3</i>					X	
Líquenes						
<i>Collema coccophorum</i> Tuck.	X	X	X	X	X	X
<i>Endocarpon pallidum</i> Ach.	X	X	X		X	X
<i>Placydium squamulosum</i> (Ach.) Breuss					X	
<i>Liquen 1</i>	X	X			X	X

Costras biológicas del suelo

<i>Liquen 2</i>		X			X	
<i>Liquen 3</i>		X			X	X
<i>Liquen 4</i>					X	
<i>Liquen 5</i>		X			X	
<i>Liquen 6</i>					X	X
<i>Liquen 7</i>		X		X	X	
<i>Liquen 8</i>					X	
<i>Liquen 9</i>		X				X
<i>Liquen 10</i>		X				
<i>Liquen 11</i>		X				
<i>Liquen 12</i>	X					
<i>Liquen 13</i>	X					

Las costras en los sitios con suelo de textura fina presentaron 21 especies. Las cianobacterias *Chroococcidiopsis* sp., *M. paludosus* y *S. javanicum*, así como los líquenes *C. coccophorum* y *E. pallidum*, fueron las más comunes debido a que se presentaron en > 80% de las muestras. No se registró ninguna especie de musgo. El número de especies observado en el mezquital cerrado fue de 12; mientras que el número de especies calculado con el estimador Jackknife 1 fue 16, lo cual sugiere que se muestreó el 75% (i.e., 12/16) del total de las especies estimadas (Fig. 3a). En el caso del mezquital abierto, el número de especies observado fue de 17; mientras que el número de especies calculado fue de 18, por lo que se muestreó el 94% del total de las especies estimadas (Fig. 3b). El número de especies observado en el campo de cultivo fue de 5, y el número de especies calculado fue de 5, por lo que se muestreó el 100% del total de las especies (Fig. 3c).

Las costras en los sitios con suelo de textura gruesa presentaron 25 especies. Las cianobacterias *M. paludosus*, *Schizothrix friesii* y *S. javanicum*; los musgos *B. argenteum* y *P. replicatum*; así como los líquenes *C. coccophorum* y *E. pallidum* fueron las especies más comunes, debido a que se presentaron en > 80% de las muestras. El número de especies observado en el mezquital cerrado fue de 13; mientras que el número de especies calculado con Jackknife 1 fue de 17, por lo que se muestreó el 76% del total de las especies estimadas (Fig. 4a). El número de especies observado en el mezquital abierto fue de 24; mientras que el número de especies calculado fue de 30, lo que sugiere que se muestreó el 80% del total de las especies estimadas (Fig. 4b). Por último, el número de especies observado en el campo de cultivo fue de 12 y el número de especies calculado fue de 13, por lo que se muestreó el 92% del total de las especies (Fig. 4c).

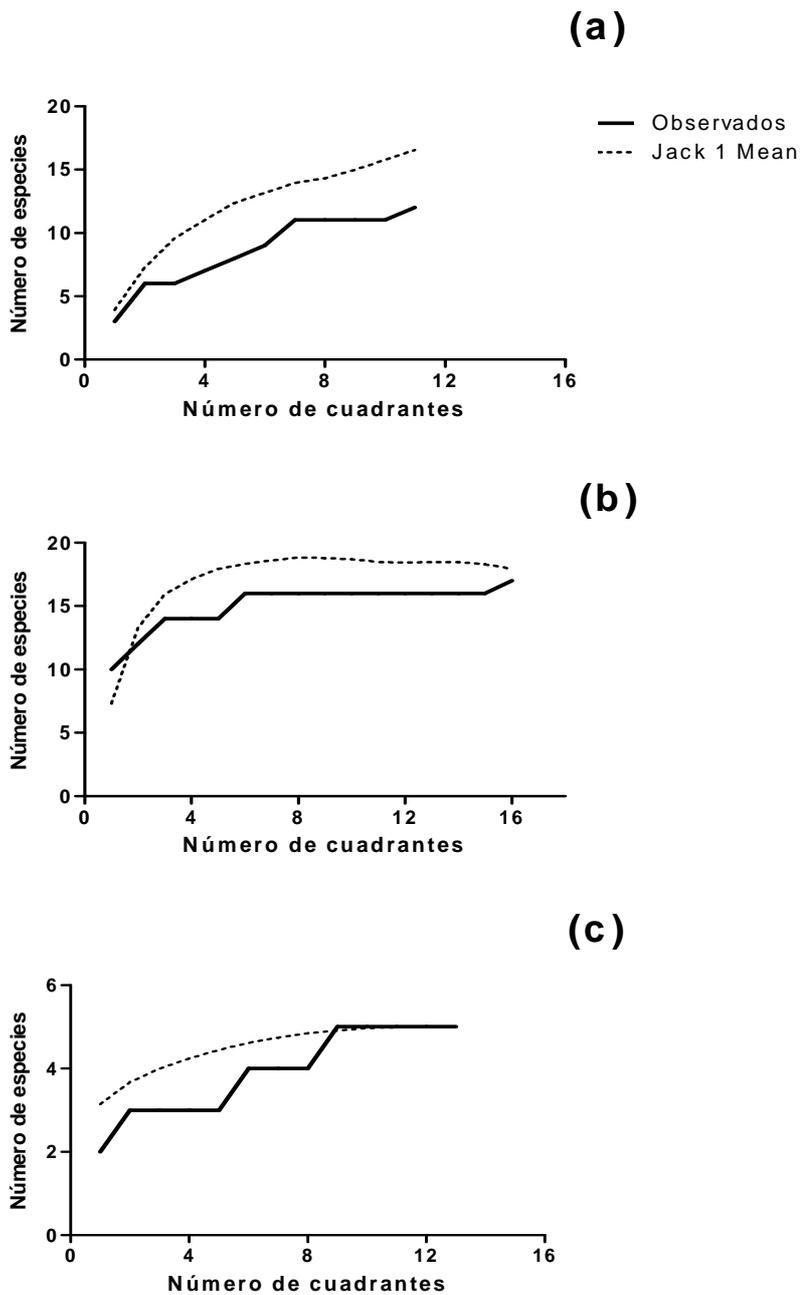
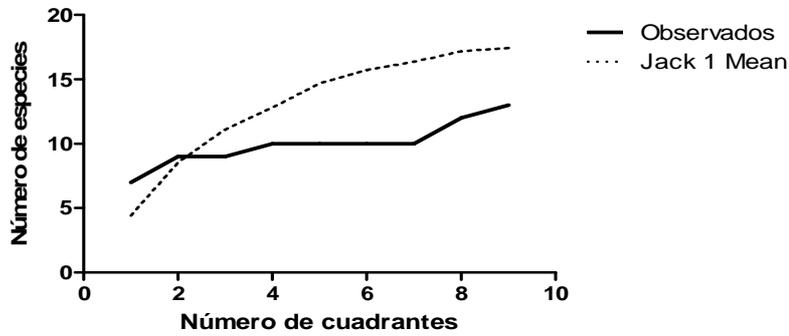
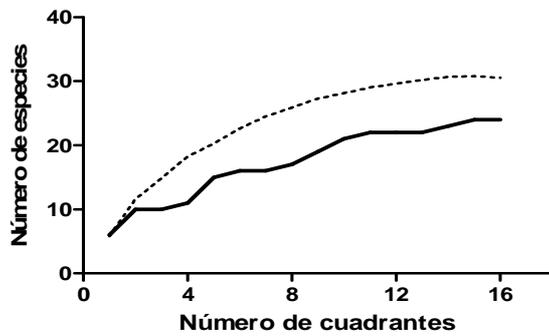


Figura 3. Número de especies de cianobacterias, musgos y líquenes observadas (línea continua) y calculadas con el estimador Jackknife 1 (línea discontinua) en el mezquital cerrado (a), el mezquital abierto (b) y el campo de cultivo (c) del sitio con suelo de textura fina, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

(a)



(b)



(c)

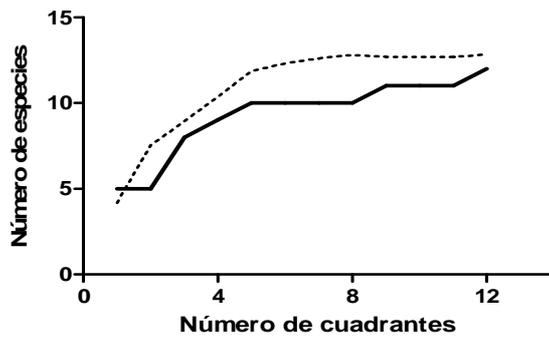


Figura 4. Número de especies de cianobacterias, musgos y líquenes observadas (línea continua) y calculadas con el estimador Jackknife 1 (línea discontinua) en el mezquital cerrado (a), el mezquital abierto (b) y el campo de cultivo (c) del sitio con suelo de textura gruesa, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

4.2 Riqueza específica

La riqueza específica de las costras biológicas en el suelo con textura fina varió dependiendo del tipo de cobertura vegetal. Las costras en el mezquital cerrado registraron 12 especies, en el mezquital abierto 17 y en el campo de cultivo 5. Las diferencias entre el mezquital cerrado y abierto no fueron significativas, mientras que el campo de cultivo sí fue significativamente diferente de ambos mezquिताles (Fig. 5a).

En contraste, la riqueza específica de las costras en el suelo de textura gruesa no varió dependiendo del tipo de cobertura vegetal. Las costras en el mezquital cerrado presentaron 13 especies, en tanto que 24 fueron registradas para el mezquital abierto y 11 en el campo de cultivo. Estas diferencias no fueron significativas (Fig. 5b).

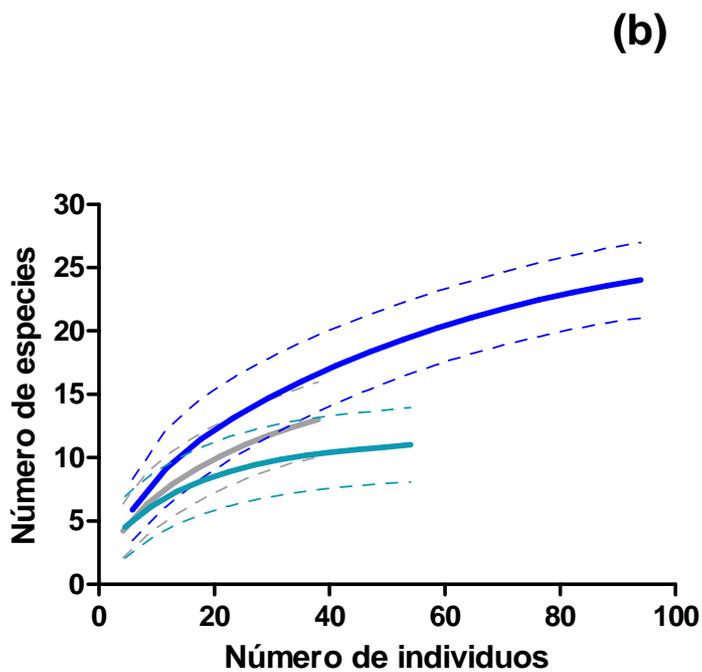
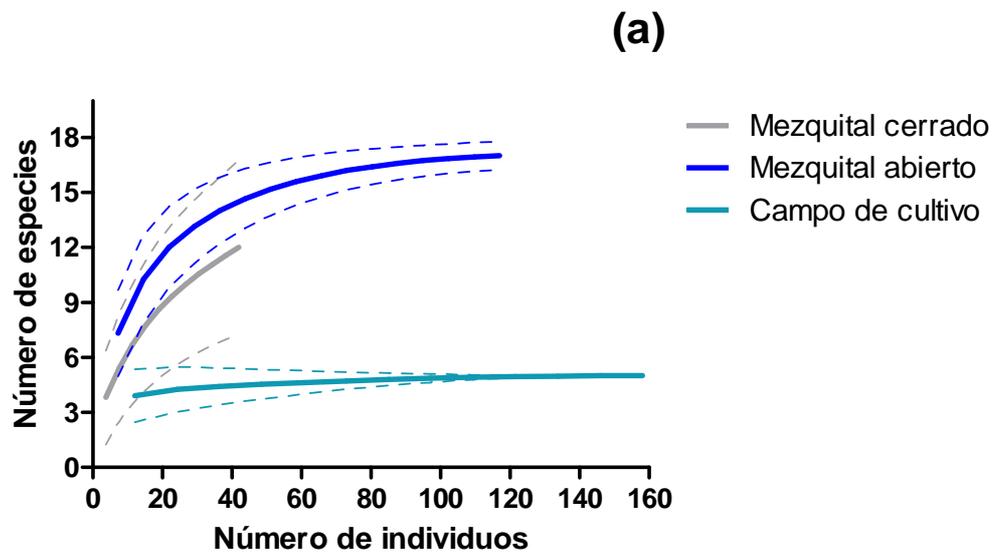


Figura 5. Número de especies observadas (línea continua) e intervalo de confianza del 95% (línea discontinua) en tres tipos de cobertura vegetal ubicados en sitios con suelo de textura fina (a) y suelo de textura gruesa (b), en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

4.3 Similitud de especies

Los índices de similitud en el suelo de textura fina mostraron que las costras del mezquital cerrado compartieron un mayor número de especies con las costras del campo de cultivo ($I_j = 0.55$), que con las costras del mezquital abierto ($I_j = 0.4$). Las costras del mezquital abierto y el campo de cultivo compartieron el menor número de especies ($I_j = 0.38$) (Cuadro 3a).

Con respecto a la similitud en el suelo de textura gruesa, las costras del mezquital cerrado y el campo de cultivo compartieron un mayor número de especies ($I_j = 0.8$), en comparación con las costras del mezquital cerrado y abierto ($I_j = 0.59$). Por último, el mezquital abierto y el campo de cultivo compartieron el menor número de especies ($I_j = 0.42$) (Cuadro 3b).

Cuadro 3. Índices de similitud de Jaccard entre las costras biológicas del mezquital cerrado, el mezquital abierto y el campo de cultivo en el suelo de textura fina (a) y el suelo de textura gruesa (b) de las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

(a)

	Mezquital cerrado	Mezquital abierto	Campo de cultivo
Mezquital cerrado	-	0.4	0.55
Mezquital abierto	0.4	-	0.38
Campo de cultivo	0.55	0.38	-

(b)

	Mezquital cerrado	Mezquital abierto	Campo de cultivo
Mezquital cerrado	-	0.59	0.8
Mezquital abierto	0.59	-	0.42
Campo de cultivo	0.8	0.42	-

4.4 Cobertura

La cobertura de las cianobacterias, líquenes y musgos en el suelo con textura fina varió dependiendo del tipo de cobertura vegetal. En el mezquital cerrado, las cianobacterias tuvieron una cobertura significativamente mayor ($49.4 \pm 15.1 \text{ cm}^2$; media \pm error estándar) que los musgos ($2.25 \pm 1.08 \text{ cm}^2$) y los líquenes ($1.68 \pm 1.03 \text{ cm}^2$). Las diferencias entre los musgos y los líquenes no fueron significativas ($F = 9.78, p = < 0.0001$). En el mezquital abierto, las cianobacterias también tuvieron una cobertura significativamente mayor ($283.4 \pm 18.9 \text{ cm}^2$) que los líquenes ($41.1 \pm 5.8 \text{ cm}^2$) y los musgos ($1.63 \pm 1.63 \text{ cm}^2$). Todas las diferencias entre los grupos fueron significativas ($F = 178.3, p = < 0.0001$). Por último, las

cianobacterias fueron el único grupo presente en las costras del campo de cultivo con una cobertura de $70.3 \pm 21.7 \text{ cm}^2$ (Fig. 6a).

La cobertura de las cianobacterias, líquenes y musgos en el suelo de textura gruesa también varió dependiendo del tipo de cobertura vegetal. En el mezquital cerrado, las cianobacterias tuvieron una cobertura de $84.3 \pm 32.7 \text{ cm}^2$, los musgos de $25.1 \pm 12.5 \text{ cm}^2$ y los líquenes de $3.5 \pm 3.06 \text{ cm}^2$. Todas estas diferencias fueron estadísticamente significativas ($F = 4.25, p = 0.02$). En el mezquital abierto, las cianobacterias también fueron el grupo con la mayor cobertura ($253.1 \pm 28.8 \text{ cm}^2$), seguido por los líquenes ($46 \pm 8.0 \text{ cm}^2$) y los musgos ($44.2 \pm 18.7 \text{ cm}^2$). Las diferencias entre los líquenes y los musgos no fueron significativas ($F = 34.7, p = < 0.0001$). Por último, las cianobacterias tuvieron una cobertura significativamente mayor ($208.1 \pm 41.5 \text{ cm}^2$) que los líquenes ($6.17 \pm 2.28 \text{ cm}^2$) en el campo de cultivo. No se encontraron musgos en este sitio ($F = 24.3, p = < 0.0001$) (Fig. 6b).

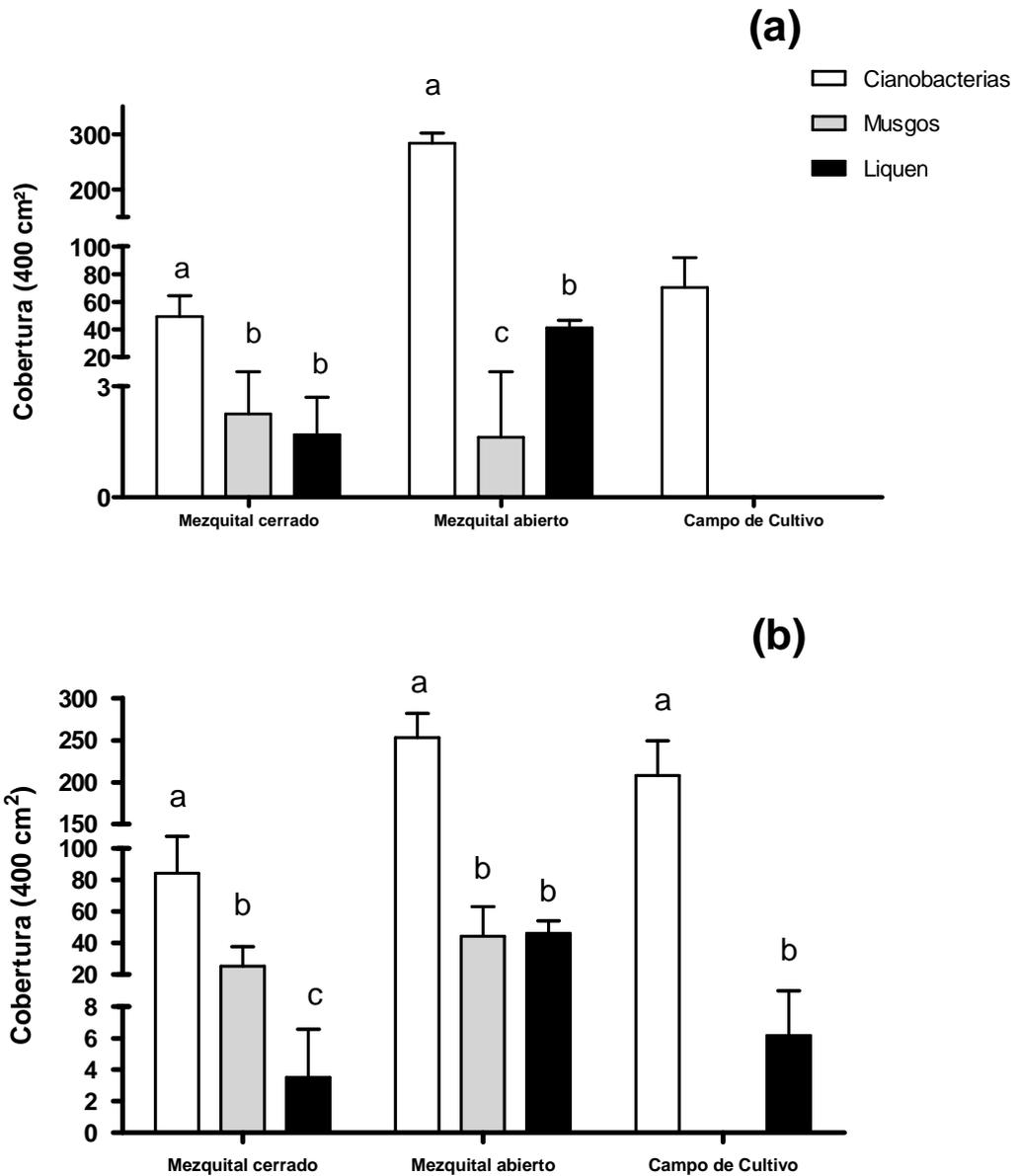


Figura 6. Cobertura de cianobacterias, musgos y líquenes en tres tipos de vegetación ubicados en sitios con suelo de textura fina (a) y textura gruesa (b) en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México. Las distintas letras en las columnas, indican diferencias significativas.

4.5 Propiedades del suelo y variables ambientales

El ANOVA multivariado de las propiedades fisicoquímicas del suelo con textura fina mostró que si existen diferencias entre los tres tipos de cobertura vegetal (Lambda de Wilks $F = 22.685$, $gl = 20$, $p = 0.019$). En cuanto a la textura del suelo, el mezquital abierto y el campo de cultivo presentaron contenidos altos de limo y arcilla al compararlos con el contenido de arena. Mientras que el mezquital cerrado reportó un contenido de arena y arcilla parecido (Fig. 7a). El mezquital cerrado reportó concentraciones altas de P, Mn y Zn. El mezquital abierto y el campo de cultivo reportaron concentraciones altas de CaCO_3 y Mg, así como concentraciones intermedias y bajas de P, Mn y Zn. Todos los sitios presentaron valores relativamente similares de pH, CE y concentraciones de K (Cuadro 4). Las variables ambientales también variaron entre los 3 tipos de cobertura vegetal. El mezquital cerrado presentó altos porcentajes de cobertura de hojarasca y cobertura del dosel, y un bajo porcentaje de cobertura de rocas. El mezquital abierto y el campo de cultivo, por el contrario, registraron un alto porcentaje de cobertura de rocas y bajos porcentajes de cobertura de hojarasca y cobertura del dosel (Fig. 8a).

El ANOVA multivariado de las propiedades fisicoquímicas del suelo de textura gruesa mostró diferencias significativas entre los tipos de cobertura vegetal (Lambda de Wilks $F = 31.82$, $gl = 20$, $p = 0.010$). En cuanto a la textura del suelo, el mezquital cerrado registró un contenido alto de arenas y contenidos bajos de arcillas y limo. El mezquital abierto presentó contenidos altos de arcillas y limos comparados con el contenido de arenas. En el campo de cultivo el contenido de arena y limo fue similar, en tanto que el contenido de arcilla fue bajo (Fig. 7b). El mezquital cerrado registró concentraciones altas de P, Mg, Zn y Mn. De manera contraria, el mezquital abierto y el campo de cultivo presentaron concentraciones

altas de CaCO_3 . Los tres sitios presentaron valores similares de pH, CE y concentración de K (Cuadro 4). Con respecto a las variables ambientales, el mezquital cerrado presentó porcentajes altos de cobertura del dosel y cobertura de hojarasca y un porcentaje bajo de cobertura de rocas. El mezquital abierto y el campo de cultivo reportaron porcentajes altos de cobertura de rocas, bajos de cobertura del dosel y cobertura de hojarasca, excepto en el campo de cultivo, en donde la cobertura de la hojarasca fue similar a la de las rocas (Fig. 8b).

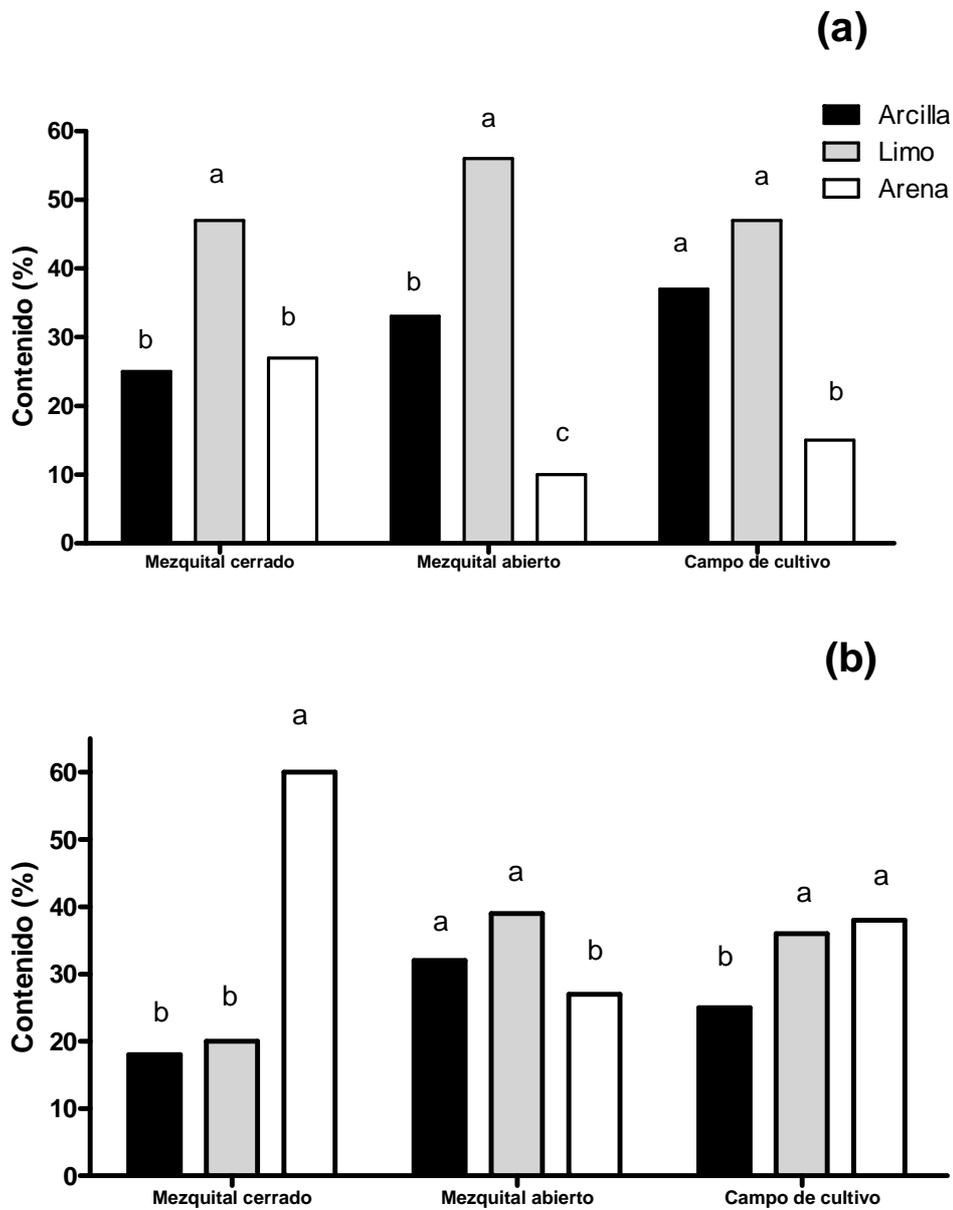
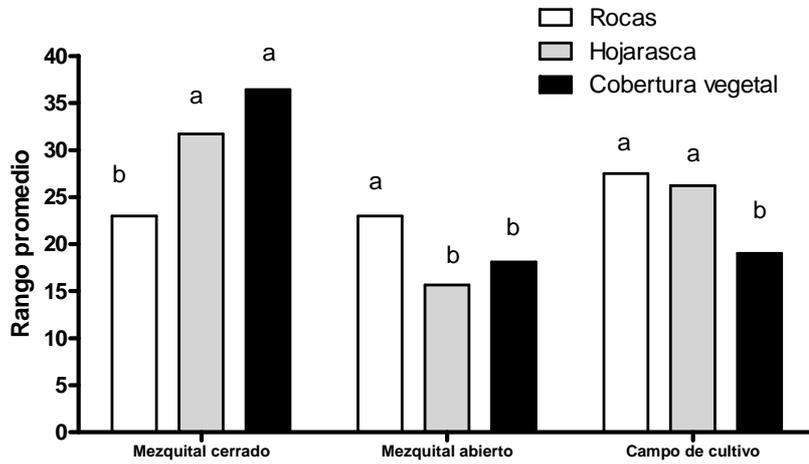


Figura 7. Contenido de arcilla, limo y arena en tres tipos de cobertura vegetal reportados en un suelo de textura fina (a) y textura gruesa (b), en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México. Las distintas letras en las columnas, indican diferencias significativas.

Cuadro 4. Promedio (\pm error estándar) de las propiedades fisicoquímicas del suelo en tres tipos de cobertura vegetal, ubicados en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

Propiedad	<u>Suelo de textura fina</u>			<u>Suelo de textura gruesa</u>		
	Mezquital cerrado	Mezquital abierto	Campo de cultivo	Mezquital cerrado	Mezquital abierto	Campo de cultivo
p H	7.68 \pm 0.05	7.96 \pm 0.05	8.23 \pm 0.05	7.80 \pm 0.05	8.04 \pm 0.05	8.18 \pm 0.05
CE(dS m ⁻¹)	0.31 \pm 0.04	0.23 \pm 0.04	0.32 \pm 0.04	0.20 \pm 0.01	0.19 \pm 0.01	0.15 \pm 0.01
P (mg P g ⁻¹)	48.06 \pm 3.54	1.78 \pm 3.54	15.93 \pm 3.54	19.18 \pm 2.69	9.56 \pm 2.69	12.87 \pm 2.69
K(cmol+kg ⁻¹)	0.98 \pm 0.07	0.88 \pm 0.07	0.92 \pm 0.076	1.28 \pm 0.159	1.2 \pm 0.15	1.14 \pm 0.15
Mg(cmol+kg ⁻¹)	2.50 \pm 0.13	2.28 \pm 0.13	4.01 \pm 0.13	3.01 \pm 0.12	2.43 \pm 0.12	2.41 \pm 0.12
Mn(mg kg ⁻¹)	24 \pm 2.48	12.18 \pm 2.48	19.87 \pm 2.48	13.56 \pm 1.47	11.43 \pm 1.47	8.18 \pm 1.47
Zn(mg kg ⁻¹)	5.67 \pm 0.57	0.44 \pm 0.57	0.90 \pm 0.57	3.91 \pm 0.32	0.76 \pm 0.32	0.41 \pm 0.32
CaCO ₃ (%)	17.31 \pm 0.38	22.62 \pm 0.38	23 \pm 0.38	8.43 \pm 0.49	24.25 \pm 0.49	14.93 \pm 0.49

(a)



(b)

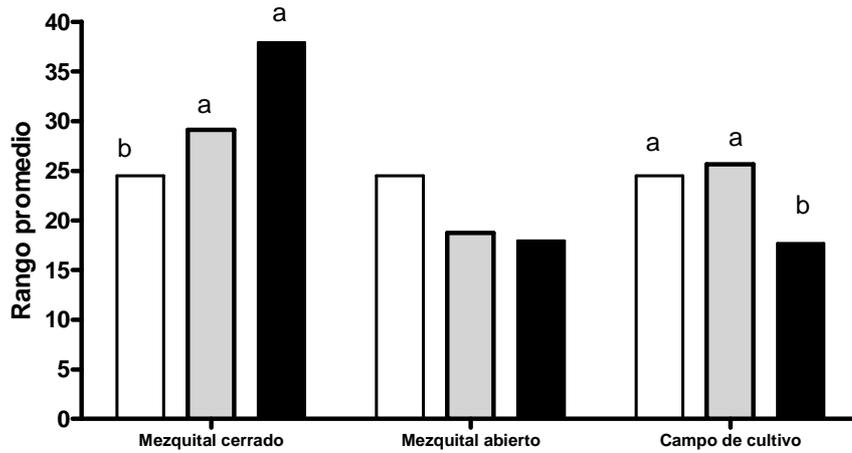


Figura 8. Rango promedio de la cobertura de rocas, cobertura de hojarasca y cobertura del dosel, en tres tipos de cobertura vegetal ubicados en sitios con suelo de textura fina (a) y gruesa (b), en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México. En cada tipo de cobertura vegetal, las columnas señaladas con letras distintas son significativamente diferentes.

4.6 Relación entre las propiedades del suelo, las variables ambientales y las costras biológicas

Los árboles de regresión multivariada mostraron que la relación entre las propiedades del suelo, las variables ambientales, y la cobertura de las cianobacterias y los líquenes varían dependiendo del tipo de suelo. En el suelo de textura fina, el árbol explicó 80% de la varianza total (Cuadro 5a). El tipo de cobertura vegetal fue la variable más importante, ya que separó al mezquital cerrado y campo de cultivo, del mezquital abierto. En el mezquital cerrado y campo de cultivo, los sitios con 50-75% de hojarasca (hojar = 3) presentaron valores intermedios de cobertura de cianobacterias. En los sitios con 0-25% (hojar = 1), 25-50% (hojar = 2) y 75-100% (hojar = 4) de cobertura de hojarasca, se relacionaron con la concentración de Mn y la cobertura de las cianobacterias. Los sitios con menor concentración de Mn reportaron baja cobertura y los sitios con mayor concentración de Mn registraron coberturas intermedias de cianobacterias. En el mezquital abierto, la arcilla fue la variable que se relacionó con la cobertura de cianobacterias y líquenes. Los sitios con mayor contenido de arcilla presentaron alta cobertura de cianobacterias y líquenes, mientras que los sitios con menor contenido de arcilla reportaron una cobertura relativamente baja (Fig. 9).

En el suelo de textura gruesa, el árbol explicó 67% de la varianza total (Cuadro 5b). El contenido de arcilla fue la variable más importante ya que separó a los sitios en dos grupos: de alto y de bajo contenido de arcilla. En los sitios con alto contenido de arcilla, la menor concentración de CaCO_3 se relacionó con la mayor cobertura de cianobacterias y líquenes, mientras que la mayor concentración de CaCO_3 resultó en una cobertura relativamente menor de estos grupos. En los sitios con bajo contenido de arcilla, una cobertura del dosel

del 75-100% (cober = 4) se relacionó con la menor cobertura de las cianobacterias. En las coberturas del dosel de 0-75% (cober = 1, 2, 3), la cobertura de las cianobacterias y líquenes varió dependiendo del contenido de K, los sitios con menor concentración de K tuvieron coberturas intermedias, en tanto que los sitios con la mayor concentración de K tuvieron coberturas bajas de estos grupos (Fig. 10).

La relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo, las variables ambientales y la presencia de las especies de cianobacterias y líquenes también varió dependiendo del tipo de suelo (Cuadro 6). En el suelo de textura fina, el árbol explicó 48% de la varianza total (Cuadro 6a). El tipo de cobertura vegetal fue la variable más importante. En los sitios con mezquital abierto se registraron las especies de musgos *Dydimodon* sp., *P. aureum* y *P. replicatum*. Estas especies estuvieron ausentes en el mezquital cerrado y el campo de cultivo. Otras variables relativamente menos importantes fueron la baja concentración de Zn, la cual se relacionó con *Chroococcidiopsis* sp. y *M. paludosus*. Y la baja concentración de P, se relacionó con *M. paludosus*, un alto contenido de arcilla se relacionó con el *Musgo* 2 y el 50-75% de cobertura de hojarasca (hojar = 3) se relacionó con *C. coccophorum* (Fig. 11).

En el suelo de textura gruesa, el árbol explicó 46% de la varianza total (Cuadro 6b). Las variables más importantes fueron la concentración de CaCO_3 , la CE y la concentración de Zn (5%) (Cuadro 6b). En los sitios con alta concentración de CaCO_3 se reportaron las especies *C. coccophorum* y *E. pallidum*. Estas especies estuvieron ausentes en los sitios con baja concentración de CaCO_3 . La CE se relacionó con las especies *Chroococcidiopsis* (CE ≥ 0.18); así como con *M. paludosus* y *P. replicatum* (CE < 0.18). La variación en la concentración de Zn se relacionó con las especies *Aloina hamulus* y *P. replicatum* (Zn \geq

0.53); así como con *E. pallidum* ($Zn < 0.53$). Otra variable menos importante fue la concentración de K, la cual se relacionó con *B. argenteum* y *P. aureum* ($K \geq 2.08$); así como con *C. coccophorum* ($K < 1.17$) (Fig. 12).

Cuadro 5. Porcentaje de varianza explicado por el árbol de regresión multivariada entre las propiedades del suelo, variables ambientales, y la cobertura de cianobacterias y líquenes en sitios con suelo de textura fina (a) y gruesa (b), en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

(a)

	Vegetación= 1, 3	Hojarasca =1, 2, 4	Mn <40	Arcilla < 32	Varianza total del árbol	Total por grupo
Cianobacterias	62	5	5	6	78	96
Líquenes	2	0	0	0	2	4
Especies de la varianza total	64	5	5	6	80	100

(b)

	Arcilla <26	Cobertura = 4	K>0.70	CaCO ₃ >23.74	Varianza total del árbol	Total por grupo
Cianobacterias	36	11	7	9	63	95
Líquenes	1	1	1	2	5	5
Especies de la varianza total	37	12	8	11	67	100

Cuadro 6. Porcentaje de varianza explicado por el árbol de regresión multivariada entre las propiedades del suelo, variables ambientales, y la presencia de las especies en sitios con suelo de textura fina (a) y gruesa (b), en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

(a)

Especies	Vegetación=1,3	Zn >=7.68	P < 0.33	Arcilla>=33.8	Hojarasca=1,2	Varianza total del árbol	Total por grupo
<i>Chroococidiopsis</i> sp.	1	2	0	0	0	3	6
<i>Microcoleus paludosus</i> (Kutz.) Gomont	0	2	3	0	0	5	9
<i>Nostoc</i> sp.	1	1	0	0	0	2	10
<i>Schizothrix friesii</i> (Ag.) Gomont	1	0	0	0	1	2	7
<i>Scytonema javanicum</i> Bornet	0	0	1	1	0	2	7
<i>Aloina hamulus</i> (C. Muell.)Broth	3	0	0	0	0	3	8
<i>Bryum argenteum</i> Hedw.	0	0	0	0	0	0	3
<i>Dydimodon</i> sp.	7	0	0	0	0	7	9
<i>Pseudocrossidium replicatum</i> (Tayl.) Zand.	5	0	0	1	0	7	9
<i>Pseudocrossidium aureum</i> (Bartr.) Zand.	5	0	0	0	0	5	9
<i>Musgo 1</i>	0	0	0	0	1	2	4
<i>Musgo 2</i>	0	0	0	1	0	1	3
<i>Musgo 3</i>	0	0	0	0	0	1	2
<i>Collema coccophorum</i> Tuck.	0	0	0	0	1	2	2
<i>Endocarpon pallidum</i> Ach.	0	0	0	1	0	1	3
<i>Placydium squamulosum</i> (Ach.) Breuss	2	0	1	1	0	4	5
<i>Liquen 1</i>	1	0	0	1	0	2	4
Especies de la varianza total	25	5	6	5	5	48	100

(b)

Especies	CaCO ₃ <21.11	CE>=0.17	K<2.07	Zn<0.53	K>=1.17	Varianza total del árbol	Total por grupo
<i>Chroococidiopsis</i> sp.	0	2	0	0	0	2	8
<i>Microcoleus paludosus</i> (Kutz.) Gomont	1	3	0	0	1	5	10
<i>Nostoc</i> sp.	1	0	0	0	0	0	5
<i>Schizothrix friesii</i> (Ag.) Gomont	1	0	0	0	0	0	6
<i>Scytonema javanicum</i> Bornet	0	0	0	0	1	0	2
<i>Aloina hamulus</i> (C. Muell.)Broth	0	0	0	2	0	4	7
<i>Bryum argenteum</i> Hedw.	0	1	1	1	1	4	9
<i>Dydimodon</i> sp.	0	0	0	0	0	1	6
<i>Pseudocrossidium replicatum</i> (Tayl.) Zand.	1	3	0	2	0	5	8
<i>Pseudocrossidium aureum</i> (Bartr.) Zand.	0	1	1	1	0	3	6
<i>Musgo 1</i>	0	0	1	0	0	1	3
<i>Musgo 2</i>	0	0	1	0	1	3	3
<i>Musgo 3</i>	0	0	0	0	0	0	2
<i>Collema coccophorum</i> Tuck.	6	0	1	0	1	6	8
<i>Endocarpon pallidum</i> Ach.	2	0	0	2	0	5	6
<i>Placydium squamulosum</i> (Ach.) Breuss	1	0	0	0	0	2	4
<i>Liquen 1</i>	4	0	0	1	0	5	7
Especies de la varianza total	17	10	5	9	5	46	100

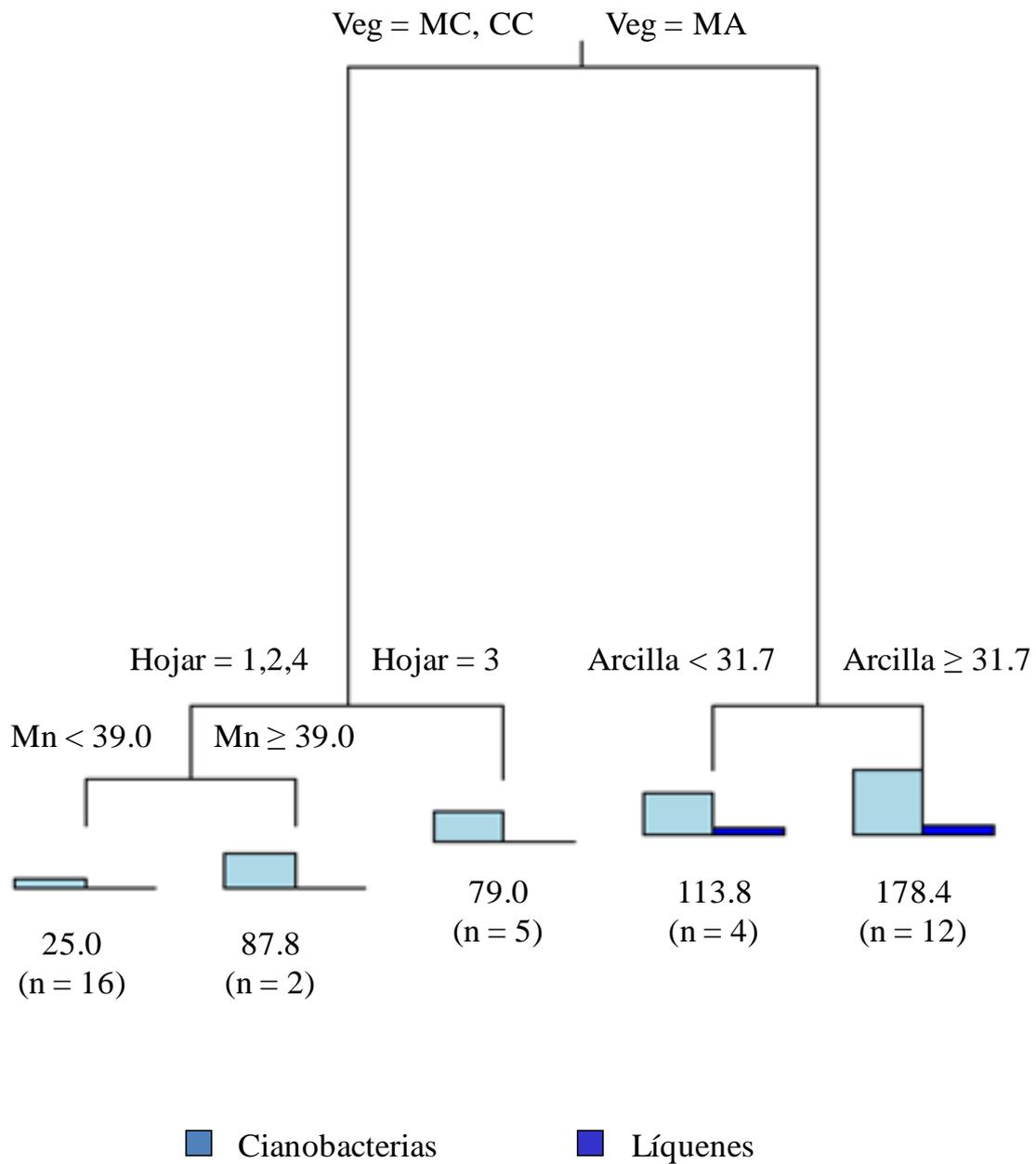


Figura 9. Árbol de regresión multivariada entre las propiedades del suelo, variables ambientales, y la cobertura de cianobacterias y líquenes en un sitio con suelo de textura fina, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México. Se muestra la variable más importante, el tipo de cobertura vegetal, mezquital cerrado (MC), mezquital abierto (MA) y campo de cultivo (CC) y su relación con otras variables.

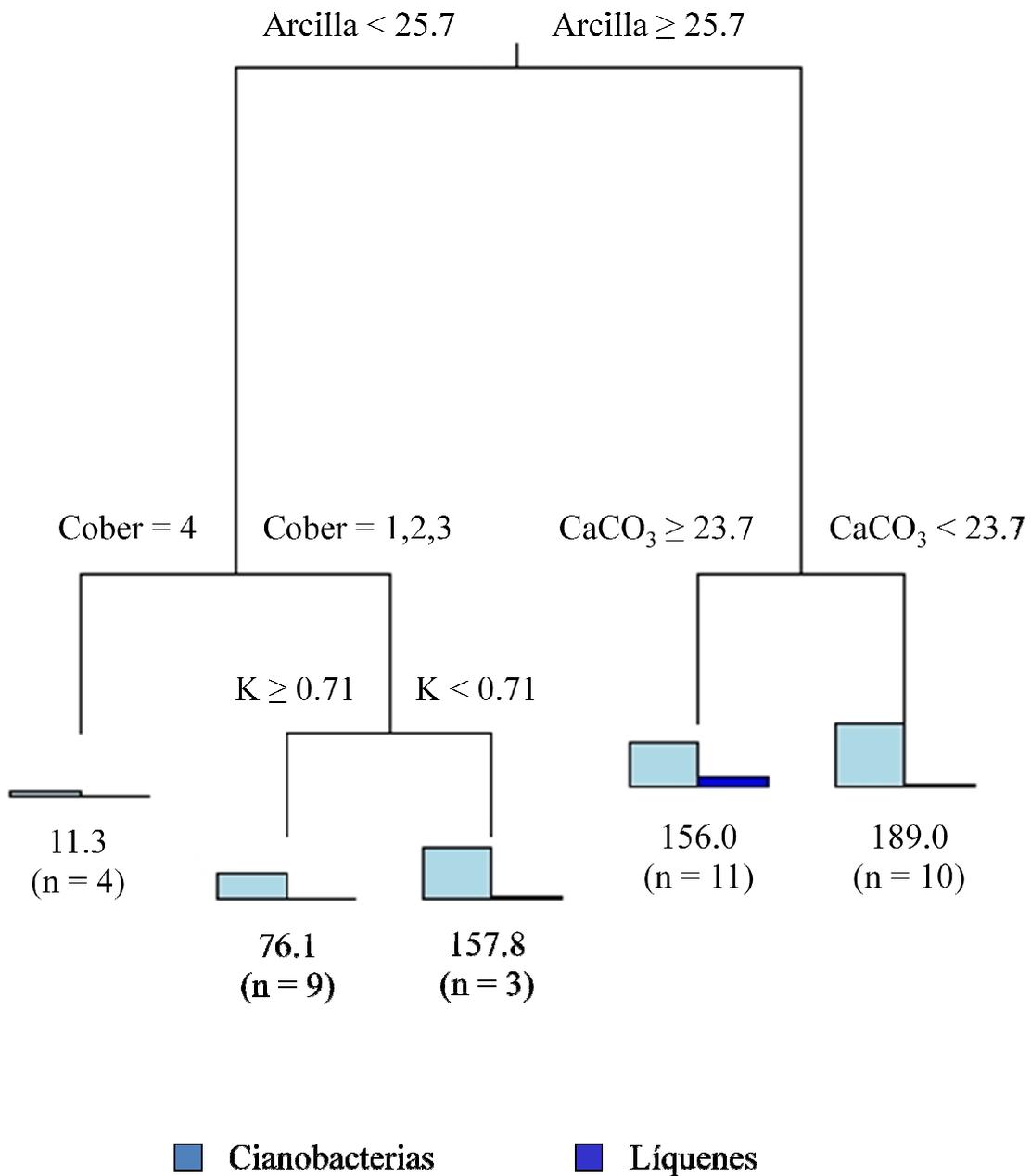


Figura 10. Árbol de regresión multivariada entre las propiedades del suelo, variables ambientales, y la cobertura de cianobacterias y líquenes en un sitio con suelo de textura gruesa, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

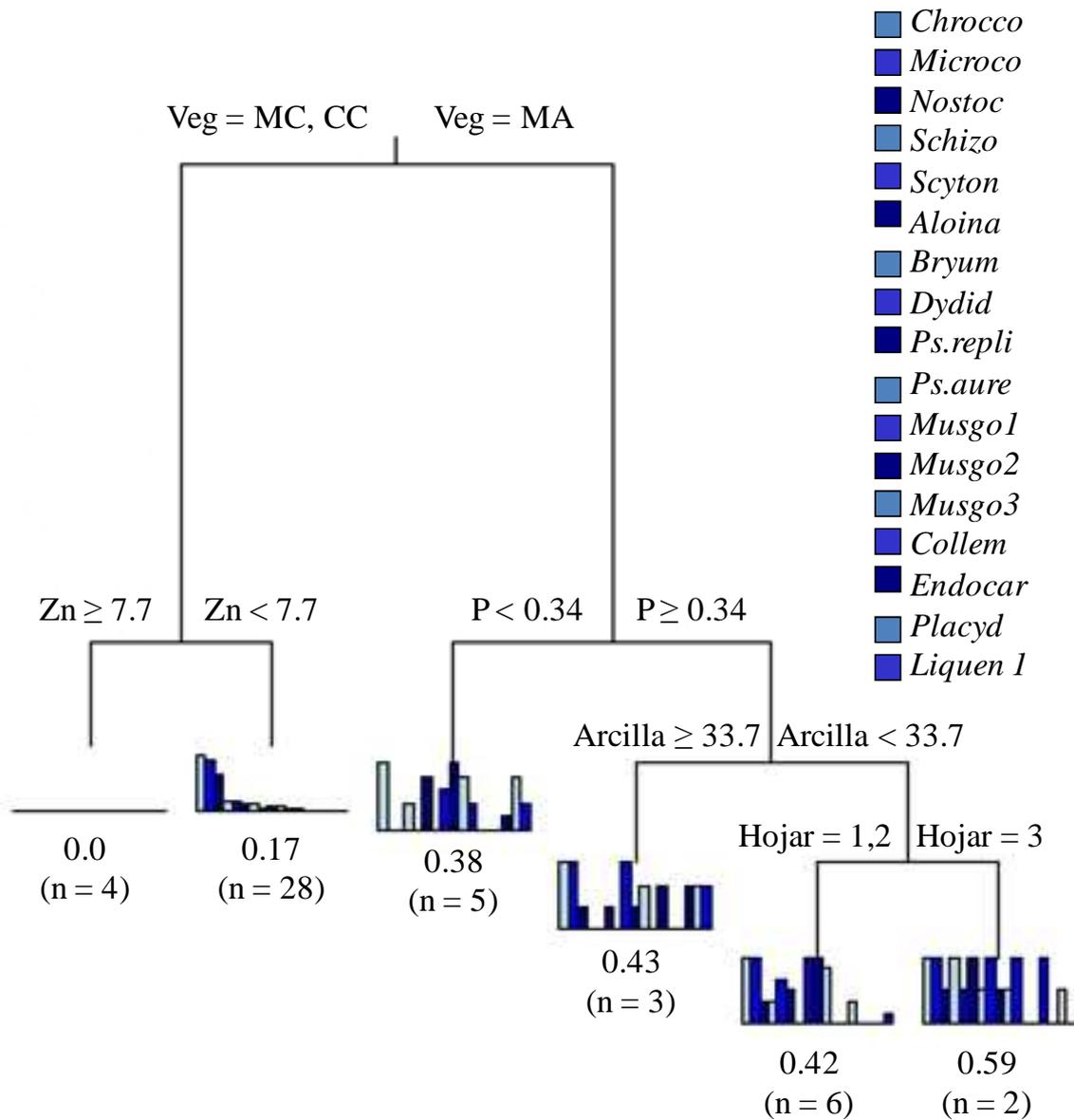


Figura 11. Árbol de regresión multivariada entre las propiedades del suelo, variables ambientales, y la presencia/ausencia de las especies en un sitio con suelo de textura fina, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

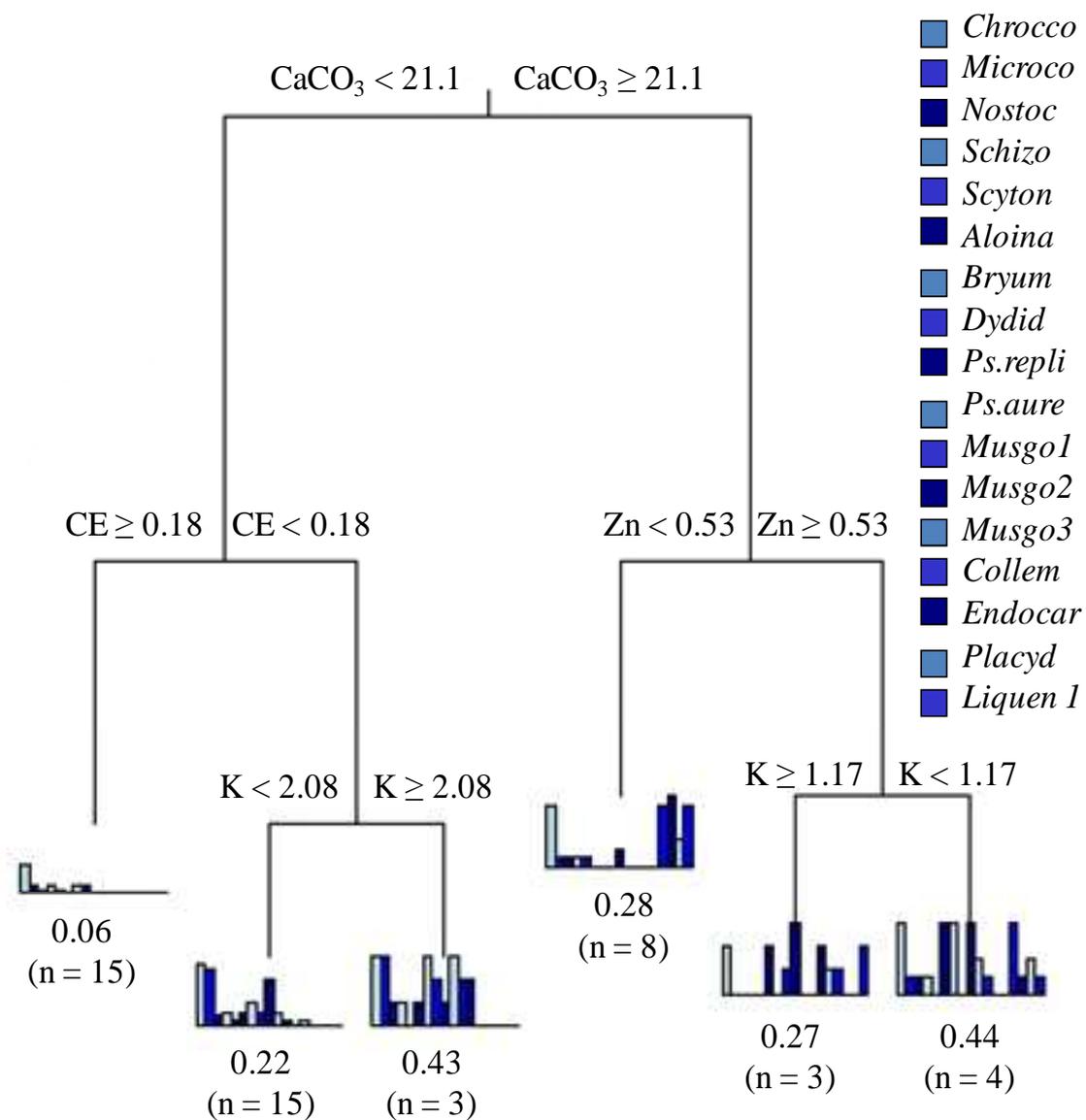


Figura 12. Árbol de regresión multivariada entre las propiedades del suelo, variables ambientales, y la presencia/ausencia de las especies en un sitio con suelo de textura gruesa, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

5. DISCUSIÓN

El objetivo general del presente trabajo fue determinar la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la distribución y abundancia de las costras biológicas en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México. Los resultados obtenidos se discutirán en dos secciones, en la primera parte se presentará la composición de las costras biológicas y en la segunda, la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y las costras biológicas.

5.1 Composición de las costras biológicas

Las costras muestreadas estuvieron compuestas por 29 especies, de las cuales 5 son de cianobacterias, 8 de musgos y 16 de líquenes. Los géneros más comunes de cianobacterias fueron *Chroococcidiopsis*, *Microcoleus* y *Scytonema*, mientras que los menos comunes fueron *Nostoc* y *Schizothrix*. Estos géneros son iguales a los reportados por Rivera-Aguilar *et al.* (2009), quienes trabajaron en distintos sitios del Valle de Zapotitlán. Sin embargo, estos autores encontraron 2 géneros adicionales (*Aphanocapsa* y *Gleocapsa*), los cuales no fueron encontrados en este trabajo. Estas diferencias podrían deberse a que en este proyecto de tesis sólo se muestreó en época de secas, mientras que Rivera-Aguilar *et al.* (2009) muestrearon en época de secas y lluvias. Algunos de los géneros de cianobacterias registrados en este trabajo como *Microcoleus*, *Scytonema* y *Nostoc* también han sido reportados para otros desiertos (Desierto Sonorense: Rosentreter y Belnap 2003, López-Cortes *et al.* 2010; Desierto de Mojave, Desierto Chihuahuense, Planicie del Colorado y Gran Cuenca: Rosentreter y Belnap 2003; Desierto del Monte: Gómez *et al.* 2012; Desierto de Gurbantonggut: Chen *et al.* 2007; Desierto Australiano: Eldridge y Tozer 1997). La

presencia de estos géneros en todos estos desiertos podría deberse a que presentan una alta dispersión y una gran capacidad para soportar distintas condiciones de temperatura, precipitación, así como condiciones asociadas al tipo de suelo como pH, contenido de humedad, conductividad eléctrica, entre otros (Belnap y Lange 2003, Castillo-Monroy y Maestre 2011).

Con respecto a los musgos, los géneros más comunes fueron *Bryum* y *Pseudocrossidium*, mientras que los menos comunes fueron *Dydimodon* y *Aloina*. Todos estos géneros también son iguales a los reportados por Rivera-Aguilar et al. 2009. Sin embargo, estos autores encontraron 9 géneros adicionales (*Brachymerium*, *Erpodium*, *Fabronia*, *Fissidens*, *Neohyophyla*, *Physcomitrium*, *Splachnobryum*, *Trichostomum* y *Weissia*). La incapacidad para encontrar estos géneros en las terrazas aluviales pudo deberse a que durante la época de secas, época en la que se realizó el muestreo de la tesis, las condiciones ambientales no fueron adecuadas para su desarrollo y reproducción, ya que son organismos que requieren de una suficiente humedad para poder llevar a cabo estas funciones (Delgadillo y Cárdenas 1990). Los géneros *Bryum* y *Dydimodon* también han sido reportados para otros desiertos del mundo (Sonorense, Mojave, Chihuahuense, Colorado Plateau y Great Basin: Rosentreter y Belnap 2003; Monte: Gómez et al. 2012; Gurbantonggut: Chen et al. 2007 y Sur de Australia: Eldridge y Tozer 1997). Esta presencia podría deberse a que los musgos presentan características morfológicas como el acomodo de los filidios sobre el tallo, que les permiten tolerar condiciones ambientales extremas y resistir largos periodos de desecación al no estar completamente expuestos y acumular agua (Delgadillo y Cárdenas 1990, Belnap y Lange 2003).

Los géneros más comunes de líquenes fueron *Collema* y *Endocarpon* y el menos común fue *Placydium*. Estos géneros coinciden con los reportados por Rivera-Aguilar *et al.* (2009). Sin embargo, es importante mencionar que en el presente trabajo se encontraron 16 especies, de las cuales 13 fueron morfoespecies, mientras que Rivera-Aguilar *et al.* (2009) sólo encontraron 8 especies. El mayor número de especies registradas puede deberse a que los ejemplares no pudieron ser determinados adecuadamente debido a la ausencia de estructuras reproductivas y la falta de claves taxonómicas específicas para México. Además de que la determinación de algunas especies de líquenes requiere de técnicas moleculares. Por otra parte Belnap y Lange (2003), mencionan que la diversidad de líquenes es más baja en verano, época en la que muestreó Rivera-Aguilar *et al.* (2009), por lo que este factor también pudo contribuir a dichas diferencias. En este mismo sentido, Sandoval (2011) trabajando en parcelas dentro del Valle de Zapotitlán reportó un menor número de especies de líquenes en época de lluvias y un mayor número de especies en época de secas. Los géneros *Collema* (Sonorense, Mojave, Chihuahuense, Colorado Plateau y Great Basin: Rosentreter y Belnap 2003; Monte: Gómez *et al.* 2012; Gurbantonggut: Chen *et al.* 2007 y Sur de Australia: Eldridge y Tozer 1997), *Endocarpon* y *Placydium* (Sur de Australia: Eldridge y Tozer 1997 y Monte: Gómez *et al.* 2012) también han sido reportados para distintos desiertos del mundo, lo cual apoya la idea de que estas especies son cosmopolitas (Belnap y Lange 2003).

5.2 Relación entre las propiedades del suelo, variables ambientales y las costras biológicas

Los resultados de los árboles de regresión multivariada mostraron que la relación entre la cobertura y la presencia de las especies de organismos que conforman las costras, con las propiedades del suelo y las variables ambientales varió dependiendo de la textura del suelo.

En los suelos de textura fina, la cobertura de cianobacterias y líquenes estuvo relacionada con el tipo de cobertura vegetal, la cobertura de hojarasca, el contenido de arcilla y la concentración de Mn. De todas estas variables, el tipo de cobertura vegetal fue la más importante, porque explicó el 64% de la varianza total explicada por el árbol (80%). De acuerdo con el tipo de cobertura vegetal, la cobertura de las cianobacterias y los líquenes fue mayor en el mezquital abierto. Por el contrario, los sitios con cobertura baja a intermedia de cianobacterias y ausencia de líquenes estuvieron relacionados con el mezquital cerrado y el campo de cultivo. Estos resultados apoyan la idea de que las cianobacterias y los líquenes son organismos que se distribuyen en interespacios y en sitios con una baja cobertura vegetal (Eldridge y Tozer 1997, Ullmann y Büdel 2003, Bowker *et al.* 2009 y Maestre *et al.* 2011). Las cianobacterias y los líquenes requieren de luz solar para realizar la fotosíntesis, por lo que una cobertura vegetal alta podría interferir con este proceso, afectando negativamente su cobertura (Delgadillo y Cárdenas, 1990, Belnap y Lange 2003). La relación entre la cobertura de las cianobacterias y los líquenes con el contenido de arcilla y la concentración de Mn, también ha sido reportada por otros autores como Harper y Belnap (2001), Bowker *et al.* (2005) y Bowker *et al.* (2006a). Estos autores trabajaron con las costras biológicas de algunos desiertos de EUA, como la Planicie del

Colorado, encontraron una relación positiva entre las especies de cianobacterias y líquenes con la arcilla y el Mn (Harper y Belnap 2001, Bowker *et al.* 2005 y Bowker *et al.* 2006a).

En los suelos de textura gruesa, la cobertura de cianobacterias y líquenes estuvo relacionada con el contenido de arcilla, la concentración de K, el contenido de CaCO₃ y la cobertura del dosel. De todas estas variables, la más importante fue el contenido de arcilla, la cual explicó el 37% de la varianza total explicada por el árbol (67%). De acuerdo con el contenido de arcilla se formaron dos grupos: 1) un grupo con altas coberturas de cianobacterias y líquenes que se relacionaron con un alto contenido de arcilla, y 2) otro grupo con bajas coberturas de cianobacterias y líquenes que se relacionaron con un bajo contenido de arcilla. La relación entre la alta cobertura y el alto contenido de arcillas apoya la idea de que estos organismos se relacionan con suelos con altos contenidos de arcilla (Eldridge y Tozer 1997, Read *et al.* 2008). Se ha sugerido que las cianobacterias que crecen sobre la superficie del suelo producen polisacáridos, los cuales se combinan con las partículas de arcilla del suelo, formando agregados estables. Además, los líquenes presentes en las costras presentan estructuras de fijación, las cuales al combinarse con dichos agregados también incrementan la estabilidad del suelo (Belnap *et al.* 2003). Se ha sugerido que el resultado de estas condiciones es el incremento de las partículas finas del suelo (Belnap y Lange 2003). Por otro lado, la relación entre las cianobacterias y los líquenes con el contenido de CaCO₃ apoya la idea de que estos organismos son tolerantes a este compuesto químico (Harper y Belnap 2001, Belnap y Lange 2003, Bowker *et al.* 2005). Algunos autores como Rosentreter y Belnap (2003) y Bowker *et al.* (2005) han sugerido que los líquenes pueden dividirse en dos grupos, los que crecen en suelos con altos contenidos de CaCO₃ y los que crecen en suelos con bajos contenidos de CaCO₃. La relación entre la

cobertura de las cianobacterias y los líquenes con la cobertura del dosel, en particular con una cobertura baja del dosel, podría deberse a que estos organismos toleran altas temperaturas, debido a los pigmentos que poseen (Campbell 2005, Belnap y Lange 2003).

Con respecto a la presencia de las especies que conforman las costras, en los suelos de textura fina se encontró una relación con el tipo de cobertura vegetal, el contenido de arcilla, la cobertura de hojarasca y la concentración de P y Zn. El tipo de cobertura vegetal fue la variable más importante, ya que explicó el 25% de la varianza total explicada por el árbol (48%). La cianobacteria *Nostoc* se relacionó con el mezquital cerrado y el campo de cultivo, así como la concentración de Zn. Mientras que los musgos *Pseudocrossidium replicatum* y *Musgo 2*, así como el líquen *Collema coccophorum* se relacionaron con el mezquital cerrado, la concentración de P, el contenido de arcilla y la cobertura de hojarasca. Estos resultados apoyan la idea de que la cianobacteria *Nostoc* es un género que tolera distintas condiciones ambientales de suelo y vegetación debido a que tiene pigmentos que la protegen de los rayos UV, por lo que puede distribuirse ampliamente en distintos ambientes (Rosentreter y Belnap 2003). Por otra parte, los resultados de este trabajo también apoyan la idea de que los musgos y los líquenes son afectados por condiciones ambientales como la humedad y temperatura. Los musgos, en particular, requieren altos contenidos de humedad debido a que pierden rápidamente el agua a través de su delgada cutícula (Olalla 2001, Delgadillo y Cárdenas 1990, Belnap y Lange 2003). En el mezquital cerrado, las condiciones de humedad en el suelo son relativamente elevadas debido a que la cobertura del dosel y la proporción de hojarasca son altas. Sandoval (2011) encontró una mayor cobertura de musgos debajo de *Prosopis laevigata*.

En el suelo de textura gruesa, la presencia de las especies de cianobacterias, musgos y líquenes se relacionó con el contenido de CaCO_3 , la conductividad eléctrica y la concentración de K y Zn. De todas estas variables, la de mayor importancia fue el contenido de CaCO_3 , la cual explicó el 17% de varianza total explicada por el árbol (46%). Las cianobacterias *Chroococcidiopsis* y *Microcoleus* se relacionaron con el contenido de CaCO_3 , la conductividad eléctrica y la concentración de K, mientras que los musgos *Pseudocrossidium aerum*, *Musgo 2* y *Aloina hamulus*, así como el líquen *Endocarpon pallidum* se relacionaron con el contenido de CaCO_3 y la concentración de K y Zn. Estos resultados apoyan la idea de que los géneros de cianobacterias *Chroococcidiopsis* y *Microcoleus* (Ullmann y Büdel 2003) así como los musgos y líquenes son halotolerantes (Eldridge y Tozer 1997, Rosentreter y Belnap 2003, Bowker *et al.* 2005, Bowker *et al.* 2006) y están positivamente relacionados con la concentración de K y Zn (Bowker *et al.* 2006a).

Por último, es importante recordar que: 1) los resultados de este trabajo sólo son válidos para las terrazas aluviales estudiadas debido a que no se tuvo repeticiones, y 2) los suelos de textura gruesa y fina incluyeron un rango de texturas. Estas condiciones deben considerarse en la interpretación de los resultados de la tesis.

6. CONCLUSIONES

- Las costras biológicas presentaron una mayor riqueza y abundancia de especies en las terrazas aluviales con suelos de textura gruesa.
- Las costras biológicas presentaron una mayor riqueza y abundancia de especies en los mezquiales abiertos.
- La relación entre la cobertura de las cianobacterias y los líquenes con las propiedades del suelo y las variables ambientales varió dependiendo de la textura del suelo. En el suelo de textura fina, la variable más importante fue el tipo de cobertura vegetal, mientras que en el suelo de textura gruesa fue el contenido de arcilla.
- La relación entre la presencia de las especies de las costras con las propiedades del suelo y las variables ambientales también varió dependiendo de la textura del suelo. En el suelo de textura fina, la variable más importante fue el tipo de cobertura vegetal, mientras que en el suelo de textura gruesa fue el contenido de CaCO_3 .

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Belnap, J. y Lange, O. L. (Eds.). 2003. *Biological Soil Crusts: Structure, Function and Management*. Springer, Berlin. 503 p.
- Belnap, J., Budel, B. y Lange, O. L. 2003a. Biological soil crusts: characteristics and distribution. En: Belnap, J. y Lange, O. L. (Eds.). *Biological soil crusts: structure, function and management*. Springer, Berlin. pp 3-27.
- Belnap, J., Prasse, R. y Harper, K. T. 2003b. Influence of biological soil crusts on soil environments and vascular plants. En: Belnap, J. y Lange, O. L. (Eds.). *Biological soil crusts: structure, function and management*. Springer, Berlin. pp 281-300.
- Bowker, M. A., Belnap, J., Davidson, D. W. and Phillips, L. S. 2005. Evidence for micronutrient limitation of biological soil crusts: importance to arid-lands restoration. *Ecological Applications* 15: 1941-1951.
- Bowker, A. M., Belnap, J., Davidson, D. W. and Goldstein, H. 2006a. Correlates of biological soil crust abundance across a continuum of spatial scales: support for a hierarchical conceptual model. *Journal of Applied Ecology* 43: 152- 163.
- Bowker, A. M., Belnap, J. y Miller, M. E. 2006b. Spatial modeling of biological soil crust to support rangeland assessment and monitoring. *Rangeland Ecol Manage* 59: 519-529.
- Bowker, A. M., Miller, M. E., Belnap, J., Sisk, T. D. and Johnson, N. C. 2008. Prioritizing conservation effort through the use of biological soil crust as ecosystem function indicators in an arid region. *Conservation Biology* 22: 1533-1543.

- Bowker, A. M., Belnap, J. y Davidson, D. W. 2009. Microclimate and Propagule Availability are Equally Important for Rehabilitation of Dryland N- Fixing Lichens. *Restoration Ecology* 18: 30-33.
- Bowker, A. M., Soliveres, S. y Maestre, F.T. 2010a. Competition increases with abiotic stress and regulates the diversity of biological soil crusts. *Journal of Ecology* 98: 551-560.
- Bowker, A. M., Maestre, T. F. y Escolar, C. 2010b. Biological crusts as a model system for examining the biodiversity-ecosystem function relationship in soils. *Soil Biology and Biochemistry* 42: 405-417.
- Campbell, N. A. y Reece, J. B. 2005. Biology. Séptima. Panamericana. 2462 p.
- Cárdenas, S. y Delgadillo, M. C. 2009. Musgos del valle de México. Cuadernos 40. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 283 p.
- Castillo-Monroy, A. P. y Maestre, F. T. 2011. La costra biológica del suelo: Avances recientes en el conocimiento de su estructura y función ecológica. *Revista Chilena de Historia Natural* 84: 1-21.
- Colwell, R. K., 2000. EstimateS: statistical estimation of species richness and shared species from samples. Version 6.01b. User's Guide and Application published at: <http://eeb.uconn.edu/estimates>
- Curtis, H. 2000. Biología. Sexta Ed. Médica Panamericana. Buenos Aires, Argentina pp 1420.

- Chen, Y. N., Wang, Q., Li, W. H. y Ruan, X. 2007. Microbiotic crust and their interrelations with environmental factors in the Gurbantonggut desert, western China. *Environ Geol* 52: 691-700.
- De' ath, G. 2002. Multivariate regression tres: a new technique for modeling species-environment relationship. *Ecology* 83: 1105-1117.
- Delgadillo, M. C. y Cárdenas, S. 1990. Manual de briofitas, Cuadernos 8. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 135 p.
- Eldridge, D. J. y Tozer, M. E. 1997. Environmental factors to the distribution of terricolous bryophytes and lichens in semi-arid eastern Australia. *Bryologist* 100: 28-39.
- Godínez-Álvarez, H., Morin, C. y Rivera-Aguilar, V. 2012. Germination, survival and growth of three vascular plants on biological soil crusts from a Mexican tropical desert. *Plant Biology* 14: 157-162.
- Gómez, D. A., Aranibar, J. N., Tabeni, S., Villagra, P. E., Garibotti, I. A. y Atencio, A. 2012. Biological soil crust recovery after long-term grazing exclusion in the Monte Desert (Argentina). Changes in coverage, spatial distribution, and soil nitrogen. *Acta Oecologica* 38: 33-40.
- Harper, K. T. y Belnap, J. 2001. The influence of biological soil crust on mineral uptake by associated vascular plants. *Journal of Arid Environments* 47: 347-357.
- Informe, UBIPRO 2003. Evaluación del deterioro ambiental, restauración, y conservación ecológica y manejo sustentable de recursos naturales en la subcuenca baja de Zapotitlán de las Salinas, Puebla. Facultad de Estudios Superiores Iztacala.

Universidad Nacional Autónoma de México. Unidad de Biología Tecnología y Prototipos.

Komárek, J. y Anagnostidis, K., 1989. Modern approach to the classification system of cyanophytes. IV. Nostococales. *Algological Studies* 56: 247–345.

López-Cortes, A., Maya, Y. y García-Maldonado, J. Q. 2010. Diversidad Filogenética de especies de *Microcoleus* de costras biológicas del suelo de la península de Baja California, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81: 1-7.

Maestre, F.T., Bowker, M. A., Escolar, C., Puche, M. D., Soliveres, S. 2010. Do biotic interactions modulate ecosystem functioning along abiotic stress gradients? Insights from semi-arid Mediterranean plant and biological soil crust communities. *Philosophical Transaction of the Royal Society B* 365: 2057-2070.

Maestre, F.T., Bowker, M. A., Cantón, Y., Castillo-Monroy, A. P., Cortina, J., Escolar, C., Escudero, A., Lázaro, R. y Martínez, I. 2011. Ecology and functional roles of biological soil crust in semi-arid ecosystems of Spain. *Journal of Arid Environments* 300: 1-10.

Moreno, C.E. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. M & T. Manuales y Tesis SEA, vol. 1. Zaragoza, España 47 p.

Muñoz, I. D. J. 2008. Monitoreo de propiedades físicas y químicas de un suelo aluvial de un ambiente semiárido del sur de México, para la búsqueda de indicadores que se relacionen con el estado de conservación y/o degradación del suelo. Tesis de

- Doctorado. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Muñoz-Iniestra, D. J., López, G. F., Hernández, M. M., Soler, A. A. y López, G. J. 2009. Impacto de la pérdida de la vegetación sobre las propiedades de un suelo aluvial. *Terra Latinoamericana* 27: 237-246.
- Nash, T. H. y Johnson, A. B., 1975. Catalog of the lichens of Arizona. *The Bryologist* 78: 7-24.
- Olalla, M. F. 2001. Agricultura y Desertificación. Mundi Prensa. Madrid, España. 341 p.
- Osório, B. O., Valiente-Banuet, A., Dávila, P. y Medina, R. 1996. Tipos de vegetación y diversidad *B* en el Valle de Zapotitlán de las Salinas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 59: 35-58.
- Read, C. F., Duncan, D. H., Vesk, P. A. y Elith, J. 2008. Biological soil crust distribution is related to patterns of fragmentation and land use in a dryland agricultural landscape of southern Australia. *Landscape Ecol* 23: 1093-1105.
- Rivera-Aguilar, V., Godínez-Alvarez, H., Manuell-Cacheux, I. y Rodríguez-Zaragoza, S. 2005. Physical effects of biological soil crusts on seed germination of two desert plants under laboratory conditions. *Journal of Arid Environments* 63: 344-352.
- Rivera-Aguilar, V., Montejano, G., Rodríguez-Zaragoza, S. y Durán-Díaz, A. 2006. Distribution and composition of cyanobacteria, mosses and lichens of the biological soil crust of the Tehuacán Valley, México. *Journal of Arid Environments* 67: 208-225.

- Rivera-Aguilar, V., Godínez-Álvarez, H., Moreno-Torres, R. y Rodríguez-Zaragoza, S. 2009. Soil physico-chemical properties affecting the distribution of biological soil crusts along an environmental transect at Zapotitlán drylands, México. *Journal of Arid Environments* 73: 1023-1028.
- Rosentreter, R. y Belnap, J. 2003. Biological soil crust of North America. En Belnap, J. y Lange, O. L. (Eds.). *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Springer, Berlin. pp 31-48.
- Sandoval, P. A. L. 2011. Efecto de *Mimosa luisana* (Leguminosae) y de las costras biológicas sobre la dinámica del carbono y del nitrógeno en el suelo de un ecosistema semiárido en México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. 102 p.
- Ullmann, I. y Büdel, B. 2003. Ecological determinants of species composition of biological soil crust on a landscape scale. En Belnap, J. y Lange, O. L. (Eds.). *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Springer, Berlin. pp 202-213.
- Valiente-Banuet, A., Casas, A., Alcántara, A., Dávila, P., Flores-Hernández, N., Arizmendi, Ma. del C., Villaseñor, J. L. y Ortega, R. J. 2000. La vegetación del Valle de Tehuacán Cuicatlán. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 67: 24-74.
- Wakes, C.V. y Flechtner V. R. 2002. Biological soil crust in a xeric Florida shrubland: composition, abundance, and spatial heterogeneity of crust with different disturbance histories. *Microbial Ecology* 43: 1-12.
- Zander, R. H. 1979. Techniques for study of Pottiaceae. *Taxon* 28: 643-644.

Zander, R. H. 1993. Genera of the Pottiaceae. Mosses of harsh environments. *Bulletin of the Buffalo Society of Natural Sciences* 32: 1-378.

8. APÉNDICES

Apéndice 1. Imágenes de costras biológicas encontradas en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México. **a.** Costra lisa, conformada principalmente por cianobacterias. **b.** Costra rugosa, conformada por cianobacterias y líquenes. **c.** Costra rugosa, conformada solo por musgos. **d.** Costra rugosa, conformada por cianobacterias, líquenes y musgos.



Apéndice 2. Porcentaje de arena, arcilla y limo de 96 muestras de suelo colectadas de un mezquital abierto, un mezquital cerrado y un campo de cultivo con suelo de textura fina y gruesa, en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, México.

No. de muestra	Tipo de textura	Tipo de cobertura vegetal	% de arena	% de limo	% de arcilla	Clasificación textural
1	Fina	Mezquital cerrado	25	49	26	Franco limoso
2	Fina	Mezquital cerrado	23	37	40	Franco
3	Fina	Mezquital cerrado	29	47	24	Franco
4	Fina	Mezquital cerrado	27	43	30	Franco arcilloso
5	Fina	Mezquital cerrado	27	51	22	Franco – Limoso
6	Fina	Mezquital cerrado	25	45	30	Franco
7	Fina	Mezquital cerrado	23	48	29	Franco
8	Fina	Mezquital cerrado	25	44	31	Franco
9	Fina	Mezquital cerrado	23	46	31	Franco
10	Fina	Mezquital cerrado	29	40	31	Franco
11	Fina	Mezquital cerrado	23	56	21	Franco – Limoso
12	Fina	Mezquital cerrado	23	52	25	Franco – Limoso
13	Fina	Mezquital cerrado	23	54	23	Franco – Limoso
14	Fina	Mezquital cerrado	25	50	25	Franco – Limoso
15	Fina	Mezquital cerrado	25	58	17	Franco – Limoso
16	Fina	Mezquital cerrado	25	38	37	Franco
17	Fina	Campo de cultivo	27	62	11	Franco – Limoso
18	Fina	Campo de cultivo	41	44	15	Arcilla – Limosa
19	Fina	Campo de cultivo	35	50	15	Franco - Arcillo – Limoso
20	Fina	Campo de cultivo	32	53	15	Franco - Arcillo – Limoso
21	Fina	Campo de cultivo	37	52	11	Franco - Arcillo – Limoso
22	Fina	Campo de cultivo	43	46	11	Arcilla – Limosa
23	Fina	Campo de cultivo	43	46	11	Arcilla – Limosa

24	Fina	Campo de cultivo	39	44	17	Franco - Arcilloso – Limoso
25	Fina	Campo de cultivo	35	46	19	Franco - Arcilloso – Limoso
26	Fina	Campo de cultivo	33	46	21	Franco - Arcilloso
27	Fina	Campo de cultivo	37	48	15	Franco - Arcilloso – Limoso
28	Fina	Campo de cultivo	45	44	11	Arcilla – Limosa
29	Fina	Campo de cultivo	37	48	15	Franco - Arcilloso – Limoso
30	Fina	Campo de cultivo	37	44	19	Franco - Arcilloso – Limoso
31	Fina	Campo de cultivo	41	44	15	Arcilla – Limosa
32	Fina	Campo de cultivo	43	34	23	Arcilla
33	Fina	Mezquital abierto	35	56	9	Franco - Arcilloso – Limoso
34	Fina	Mezquital abierto	29	58	13	Franco - Arcilloso – Limoso
35	Fina	Mezquital abierto	33	58	9	Franco - Arcilloso – Limoso
36	Fina	Mezquital abierto	33	54	13	Franco - Arcilloso – Limoso
37	Fina	Mezquital abierto	29	58	13	Franco - Arcilloso – Limoso
38	Fina	Mezquital abierto	33	52	15	Franco - Arcilloso – Limoso
39	Fina	Mezquital abierto	31	60	9	Franco - Arcilloso – Limoso
40	Fina	Mezquital abierto	35	50	15	Franco - Arcilloso – Limoso
41	Fina	Mezquital abierto	35	58	7	Franco - Arcilloso – Limoso
42	Fina	Mezquital abierto	31	60	9	Franco - Arcilloso – Limoso
43	Fina	Mezquital abierto	33	60	7	Franco - Arcilloso – Limoso
44	Fina	Mezquital abierto	33	52	15	Franco - Arcilloso – Limoso
45	Fina	Mezquital abierto	37	50	13	Franco - Arcilloso – Limoso
46	Fina	Mezquital abierto	37	56	7	Franco - Arcilloso – Limoso
47	Fina	Mezquital abierto	35	60	5	Franco - Arcilloso – Limoso
48	Fina	Mezquital abierto	33	56	11	Franco - Arcilloso – Limoso
49	Gruesa	Mezquital abierto	39	34	27	Franco – Arcilloso
50	Gruesa	Mezquital abierto	37	42	21	Franco – Arcilloso
51	Gruesa	Mezquital abierto	31	42	27	Franco – Arcilloso
52	Gruesa	Mezquital abierto	33	42	25	Franco – Arcilloso

53	Gruesa	Mezquital abierto	35	34	31	Franco – Arcilloso
54	Gruesa	Mezquital abierto	33	30	37	Franco – Arcilloso
55	Gruesa	Mezquital abierto	31	46	23	Franco – Arcilloso
56	Gruesa	Mezquital abierto	35	36	29	Franco – Arcilloso
57	Gruesa	Mezquital abierto	35	38	27	Franco – Arcilloso
58	Gruesa	Mezquital abierto	39	38	23	Franco – Arcilloso
59	Gruesa	Mezquital abierto	23	32	45	Franco
60	Gruesa	Mezquital abierto	35	40	25	Franco – Arcilloso
61	Gruesa	Mezquital abierto	25	44	31	Franco
62	Gruesa	Mezquital abierto	33	42	25	Franco - Arcilloso
63	Gruesa	Mezquital abierto	29	44	27	Franco - Arcilloso
64	Gruesa	Mezquital abierto	31	48	21	Franco - Arcilloso
65	Gruesa	Campo de cultivo	31	42	27	Franco - Arcilloso
66	Gruesa	Campo de cultivo	23	32	45	Franco
67	Gruesa	Campo de cultivo	31	38	31	Franco - Arcilloso
68	Gruesa	Campo de cultivo	21	32	47	Franco
69	Gruesa	Campo de cultivo	27	30	43	Franco
70	Gruesa	Campo de cultivo	25	37	38	Franco
71	Gruesa	Campo de cultivo	26	36	38	Franco
72	Gruesa	Campo de cultivo	22	34	44	Franco
73	Gruesa	Campo de cultivo	28	36	36	Franco - Arcilloso
74	Gruesa	Campo de cultivo	28	40	32	Franco - Arcilloso
75	Gruesa	Campo de cultivo	22	28	50	Franco
76	Gruesa	Campo de cultivo	24	36	40	Franco
77	Gruesa	Campo de cultivo	22	38	40	Franco
78	Gruesa	Campo de cultivo	20	44	36	Franco
79	Gruesa	Campo de cultivo	28	38	34	Franco - Arcilloso
80	Gruesa	Campo de cultivo	28	38	34	Franco - Arcilloso
81	Gruesa	Mezquital cerrado	16	24	60	Franco - Arenoso

82	Gruesa	Mezquital cerrado	18	14	68	Franco - Arenoso
83	Gruesa	Mezquital cerrado	16	24	60	Franco - Arenoso
84	Gruesa	Mezquital cerrado	16	24	60	Franco - Arenoso
85	Gruesa	Mezquital cerrado	20	24	56	Franco - Arcilloso - Arenoso
86	Gruesa	Mezquital cerrado	16	12	72	Franco - Arenoso
87	Gruesa	Mezquital cerrado	18	20	62	Franco - Arenoso
88	Gruesa	Mezquital cerrado	18	14	68	Franco - Arenoso
89	Gruesa	Mezquital cerrado	18	18	64	Franco - Arenoso
90	Gruesa	Mezquital cerrado	22	24	54	Franco - Arenoso
91	Gruesa	Mezquital cerrado	22	22	56	Franco - Arenoso
92	Gruesa	Mezquital cerrado	20	20	60	Franco - Arenoso
93	Gruesa	Mezquital cerrado	22	24	54	Franco - Arenoso
94	Gruesa	Mezquital cerrado	22	18	60	Franco - Arenoso
95	Gruesa	Mezquital cerrado	16	24	60	Franco - Arenoso
96	Gruesa	Mezquital cerrado	20	26	54	Franco - Arenoso

Apéndice 3. Descripción de morfoespecies de musgos y líquenes reportados en las terrazas aluviales del Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla.

Grupo	Morfoespecie	Descripción
1	Musgo <i>Musgo 1</i>	Tamaño grande aproximadamente 1 cm, color verde oscuro, filidios largos y delgados
2	Musgo <i>Musgo 2</i>	Tamaño y color parecido a <i>P. replicatum</i> , nervadura central no visible, filidios delgados
3	Musgo <i>Musgo 3</i>	Tamaño alargado, color verde oscuro, seco tiene forma de flor cerrada
4	Líquén <i>Liquen 1</i>	Color verde oscuro con blanco
5	Líquén <i>Liquen 2</i>	Color negro grisáceo
6	Líquén <i>Liquen 3</i>	Color beige con puntos oscuros
7	Líquén <i>Liquen 4</i>	Color café pardoso, con punto negro en el centro y ligeras manchas amarillas
8	Líquén <i>Liquen 5</i>	Color blanco, de tamaño pequeño
9	Líquén <i>Liquen 6</i>	Color verde pardoso con puntos pequeños claros
10	Líquén <i>Liquen 7</i>	Color café grisáceo
11	Líquén <i>Liquen 8</i>	Color rosa claro, de tamaño mediano
12	Líquén <i>Liquen 9</i>	Color beige, con contorno negro, hacía adentro
13	Líquén <i>Liquen 10</i>	Color verde olivo, de tamaño pequeño
14	Líquén <i>Liquen 11</i>	Color beige, con contorno verde oscuro, posición hacía adentro
15	Líquén <i>Liquen 12</i>	Color marrón, con puntos cafés y contorno verde
16	Líquén <i>Liquen 13</i>	Color gris plateado con un punto anaranjado en el centro, posición hacía adentro