

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

División de Ciencias Forestales

Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales

**COMPOSICIÓN DE LAS COSTRAS BIOLÓGICAS DEL
SUELO DE LA REGIÓN MERIDIONAL DEL
DESIERTO CHIHUAHUENSE:
EL SEMIDESIERTO QUERETANO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA

Karen Elizabeth Nuñez Solano

Chapingo, México. Enero 2019



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS ESCOLARES
SECRETARÍA DE EXÁMENES PROFESIONALES



**COMPOSICIÓN DE LAS COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO DE LA REGIÓN
MERIDIONAL DEL DESIERTO CHIHUAHUENSE:**

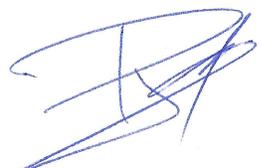
EL SEMIDESIERTO QUERETANO

TESIS REALIZADA POR LA ING. KAREN ELIZABETH NUÑEZ SOLANO BAJO LA
SUPERVISIÓN DEL COMITÉ ASESOR INDICADO, APROBADA POR EL MISMO Y
ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES



DIRECTOR: DR. DIÓDORO GRANADOS SÁNCHEZ



ASESOR: M. C. RO LINX GRANADOS VICTORINO



ASESOR: M. C. ISAURA ESCALANTE VARGAS

ÍNDICE

ÍNDICE	III
ÍNDICE DE TABLAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ANEXOS.....	VII
AGRADECIMIENTOS.....	VIII
DATOS BIOGRÁFICOS.....	IX
CAPÍTULO 1	10
INTRODUCCIÓN GENERAL	11
1.1 Antecedentes	12
1.2 Justificación.....	13
1.3 Hipótesis	14
1.4 Objetivo general.....	14
1.5 Objetivos específicos.....	14
1.6 Referencias.....	15
CAPÍTULO 2	17
REVISIÓN DE LITERATURA	18
2.1 Referencias.....	24
CAPÍTULO 3	27

COMPOSICIÓN DE LAS COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO DEL SEMIDESIERTO QUERETANO EN LA REGIÓN MERIDIONAL DEL DESIERTO CHIHUAHUENSE	28
Resumen	28
Abstract	29
1. Introducción.....	30
1.1 Biocostras.....	31
2. Materiales y métodos	33
2.1 Zona de estudio.....	33
2.2 Muestreo de biocostras.....	33
2.3 Composición de las especies de biocostras.....	34
3. Resultados.....	37
3.1 Semidesierto Queretano	37
3.2 Biocostras en México	45
4. Discusión.....	47
6. Referencias	51

Índice de tablas

Tabla 1 Algas asociadas a biocostras en el sur del Desierto Chihuahuense.	38
Tabla 2 Cianobacterias asociadas a biocostras en el sur del Desierto Chihuahuense..	39
Tabla 3 Líquenes y musgos registrados en las biocostras en el sur del Desierto Chihuahuense	42

Índice de figuras

- Fig. 1. Mapa de localización del área de estudio, se muestra los tres sitios de muestreo dentro de la región del Semidesierto Queretano, SN Sitio norte (1300 msnm); SC Sitio centro (1600 msnm) y SS Sitio Sur (1900 msnm). 34
- Fig. 2 Diversidad de algas verdes y cianobacterias encontradas en el área de estudio. (a) Klebsormidium sp., (b) Myrmecia sp., (c) Stichococcus sp. (d) Nostoc microscopicum, (e) Microcoleus sp., (f) Phormidium sp., (g) y (h) Oculatella sp. con la “mancha ocular” roja (triángulo blanco)..... 41
- Fig. 3 Diversidad de líquenes presentes en las biocostras del Semidesierto Queretano, (a) Collema sp. (b) Corte transversal del talo de Collema sp., con Nostoc sp. como fotobionte, (c) Peltulla obscurans (d) Corte transversal de Peltulla obscurans, se observa la capa algal, Chroococcidiopsis sp. como fotobionte (e) Psora decipiens, (f) Estructura interna de Psora decipiens, se observa el córtex superior, la médula, la capa algal y el córtex inferior. (g) líquen rojo (h) Corte transversal, se aprecia a Trentepholia sp. como fotobionte, unico líquen con coloración naranja-rojiza en la estructura interna del talo. 43
- Fig. 4 a) Curvas de rarefacción de la riqueza de especies de las biocostras del Semidesierto Queretano y estimador Chao2 (intervalo de confianza \pm 95%, extrema derecha). Se comparan las especies de los dos microambientes evaluados: Biocostra expuesta totalmente (BET) y Biocostra debajo de vegetación (BDV). Diferencias significativas en la riqueza de especies se suponen si los intervalos de confianza al 95% no se superponen en la asíntota de la curva. b) Análisis Clúster, usando el coeficiente de disimilitud de Sørensen-Dice y el método de aglomeración Ward, indicando la relación entre la composición de especies de los sitios y los dos microambientes evaluados en el

Semidesierto Queretano. SN: sitio norte, SC: Sitios Centro, SS: Sitio Sur; BET: Biocostra expuesta totalmente y BDV: Biocostra debajo de vegetación. 44

Fig. 5 Análisis clúster por Índice de disimilitud (Método de Ward con distancia euclidiana) que muestra las diferencias en la composición de cianobacterias, líquenes y musgos en cinco regiones áridas de México. T-C Tehuacán-Cuicatlán, PBJ Península de Baja California, DCN Desierto Chihuahuense norte, DCC Desierto Chihuahuense centro y SQ Semidesierto queretano..... 46

Anexos

Anexo 1. Composición taxonómica de las biocostras de los desiertos mexicanos..... 56

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Chapingo, por permitirme nuevamente seguir preparándome y creciendo profesionalmente, en especial al Posgrado la División de Ciencias Forestales por contribuir a mi formación académica

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento otorgado durante los estudios de maestría.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado para la realización de la estancia de investigación.

Al Dr. Diódoro Granados Sánchez, por hacerme partícipe de tan increíble proyecto, por compartir sus conocimientos y por permitirme conocer el maravilloso mundo de las biocostras.

Al M.C. Ro Linx Granados Victorino, por ser parte de esta investigación, por el apoyo en campo y su asesoría académica

A la M.C. Isaura Escalante Vargas por compartir sus conocimientos, por su paciencia y amistad brindada a lo largo de esta etapa de mi vida académica.

Al Prof. Dr. Burkhard Büdel por recibirme en su laboratorio y por todo el apoyo recibido por parte él y de su equipo de trabajo.

Al Biól. Marco Antonio Hernández Muñoz por su tiempo, dedicación y por mostrarme el extraordinario mundo de los líquenes.

A todos los que directa e indirectamente colaboraron en el trabajo en campo y laboratorio para que esta investigación llegara a buen término.

Gracias totales!!

Datos biográficos

Datos personales

Nombre: Karen Elizabeth Nuñez Solano

Fecha de nacimiento: 19 de noviembre de 1990

Lugar de nacimiento: Ciudad de México, México

CURP: NUSK901119MDFXLR00

Profesión: Ingeniera en agroecología

Cédula profesional: 09906397

Desarrollo académico

Preparatoria: Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos, no. 5, “Benito Juárez” Instituto Politécnico Nacional

Licenciatura: Ingeniería en agroecología, Universidad Autónoma Chapingo

Maestría: Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo



Capítulo 1

Introducción general

Las Costras Biológicas del Suelo (biocostras, a partir de este momento) están formadas por organismos microscópicos (cianobacterias, algas, hongos, y bacterias) y macroscópicos (líquenes, musgos y micro artrópodos) los cuales son considerados como organismos poiquilohídricos (Weber, Büdel, & Belnap, 2016), ya que las biocostras pueden subsistir en estado latente ante sequias extremas sin mostrar signos negativos y reactivar sus funciones metabólicas rápidamente con pequeñas cantidades de humedad atmosférica (punto de rocío) o con cierto contenido de agua de la superficie del suelo (Belnap *et al.*, 2001).

Las Costras Biológicas del Suelo (CBSs) forman la biomasa microbiana más productiva de la tierra; en áreas sin vegetación o sitios muy degradados, como áreas volcánicas o inundables, así como zonas áridas y semiáridas, las CBS son las primeras microcomunidades que se establecen, abriendo el paso para el desarrollo del ecosistema (Yoshitake *et al.*, 2010).

Maestre (2003) refiere que las biocostras constituyen una de las propiedades edáficas más ya que desempeñan un papel indispensable en el funcionamiento y en la dinámica de los ecosistemas semiáridos; también son utilizadas como bioindicadores de procesos de desertificación, son consideradas como las iniciadoras de la estabilidad y fertilidad del suelo y contribuyen en el restablecimiento de coberturas vegetales en zonas altamente degradadas o desertificadas (Bowker, Belnap, & Miller, 2006).

Los grupos funcionales presentes en las biocostras se ven afectados dependiendo del clima, el suelo, la topografía, el microrelieve, entre otros factores; lo que genera diferentes

composiciones y porcentajes de cobertura de sus integrantes. De acuerdo a los grupos funcionales de las biocostras, éstas puede tener distintos efectos en relación a la vegetación circundante, los cuales pueden ser neutrales, perjudiciales o benéficos (Belnap, Kaltenecker, Rosentreter, Williams, Leonard, & D.J., 2001; Eldridge, 1993; Gao, Ye, Chu, & Dong, 2010; Quiñones-Vera et al., 2009).

1.1 Antecedentes

La mayor parte de las investigaciones sobre las características e impacto de las biocostras se han desarrollado en zonas áridas y semiáridas de Australia, España, Estados Unidos y China. Los estudios se han enfocado en las biocostras, su estructura, distribución y composición taxonómica, así como el papel en los ciclos biogeoquímicos del agua, el carbono y el nitrógeno (Belnap *et al.*, 2001; Belnap *et al.*, 2004; Castillo-Monroy *et al.*, 2014; Maestre *et al.*, 2011; Zhuang, Serpe y Zhang, 2015; Condon y Pyke, 2016) a nivel de comunidad y ecosistemas. A nivel de micro escala, los estudios son limitados, sin embargo, existe suficiente evidencia de que los diferentes grupos de las biocostras exhiben papeles funcionales muy distintos, y así pueden contribuir a una heterogeneidad espacial y temporal en procesos funcionales de ecosistemas (Jiménez-Aguilar, 2005).

En México, son escasos los estudios que se han realizado sobre biocostras; se tiene información sobre el valle de Tehuacán-Cuicatlán en los estados de Puebla y Oaxaca (Rivera-Aguilar, Godínez-Alvarez, Moreno-Torres, & Rodríguez-Zaragoza, 2009; Rivera-Aguilar, Montejano, Rodríguez-Zaragoza, & Durán-Díaz, 2006a; Sandoval Pérez et al., 2016), en la región central del Desierto Chihuahuense en los estados de San Luis Potosí y Jalisco (Laura Concostrina-Zubiri, Martínez, Huber-Sannwald, & Escudero, 2013;

Jiménez-Aguilar, 2005; Jimenez-Aguilar, Huber-Sannwald, Belnap, Smart, & Moreno-Arredondo, 2009); en la península de Baja California (Büdel, Vivas, & Lange, 2013; Heckman, Anderson, & Wait, 2006; López-Cortés, Maya, & García-Maldonado, 2010b; Maya, López-Cortés, & Soeldner, 2002); así como un par de estudios relacionados con el efecto de las biocostras sobre la germinación de plantas en el desierto (Gaytán Jimenez, 2011; Mendoza-Aguilar, Cortina, & Pando-Moreno, 2014).

1.2 Justificación

Las biocostras constituyen una de las propiedades bioedáficas más importantes en los ecosistemas semiáridos, desarrollan un papel indispensable en el funcionamiento y en la dinámica de estos ambientes; también son útiles como bioindicadores de procesos de desertificación, así como indicadores de estabilidad y fertilidad de suelos; así ayudan al restablecimiento de coberturas vegetales en zonas altamente degradadas y/o desertificadas, por lo que su estudio es imprescindible para entender el comportamiento de los desiertos . En México se han desarrollado investigaciones sobre las biocostras en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán en Puebla y Oaxaca; San Luis Potosí, Baja California, Durango y en el norte del desierto Chihuahuense, sin embargo, cerca del 60% del territorio nacional presenta regiones áridas y semiáridas, es por esto que es de suma importancia ampliar este panorama; por lo que se propone el estudio de una zona que aún no ha sido investigada, el Semidesierto Queretano.

1.3 Hipótesis

La región del Semidesierto Queretano presenta características ambientales exclusivas con respecto al resto de las zonas áridas de México, por lo que la composición asociada a las Costras Biológicas del Suelo presentes en la zona, difieren con respecto a las biocostras de otros desiertos mexicanos.

1.4 Objetivo general

Caracterizar la composición taxonómica de las Costras Biológicas del Suelo del Semidesierto Queretano a través de un gradiente altitudinal y compararla con las especies reportadas en biocostras de otros desiertos mexicanos.

1.5 Objetivos específicos

Determinar la composición taxonómica de las Costras Biológicas del Suelo del Semidesierto Queretano en dos diferentes microambientes y a través de una gradiente altitudinal.

Determinar las afinidades biológicas entre la composición de las costras de los distintos desiertos en México

1.6 Referencias

- Belnap, J., Kaltenecker, J. H., Rosentreter, R., Williams, J., Leonard, S., & D.J., E. (2001). *Biological soil crusts: Ecology and management*: Denver, CO.: US Department of the Interior.
- Belnap, J., Phillips, S. L., & Miller, M. E. (2004). Response of desert biological soil crusts to alterations in precipitation frequency. *Oecologia*, 141(2), 306–316. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1438-6>
- Bowker, M. A., Belnap, J., & Miller, M. E. (2006). Spatial Modeling of Biological Soil Crusts to Support Rangeland Assessment and Monitoring. *Rangeland Ecology & Management*, 59(5), 519–529. <https://doi.org/10.2111/05-179R1.1>
- Büdel, B., Vivas, M., & Lange, O. L. (2013). Lichen species dominance and the resulting photosynthetic behavior of Sonoran Desert soil crust types (Baja California, Mexico). *Ecological Processes*, 2(1), 6. <https://doi.org/10.1186/2192-1709-2-6>
- Castillo-Monroy, A. P., Maestre, F. T., Rey, A., Soliveres, S., & García-Palacios, P. (2011). Biological Soil Crust Microsites Are the Main Contributor to Soil Respiration in a Semiarid Ecosystem. *Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9449-3>
- Castillo-Monroy, A. P., Maestre, F. T., Rey, A., Soliveres, S., García-Palacios, P., Seppelt, R. D., Vesk, P. A. (2014). Microarthropod communities related with biological soil crusts in a desert scrub in northwestern Mexico. *Ecosystems*, 23(1), 176–186. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.13>
- Concostrina-Zubiri, L., Martínez, I., Huber-Sannwald, E., & Escudero, A. (2013). Biological Soil Crust effects and responses in arid ecosystems: recent advances at the species level. *Ecosistemas*, 22(3), 95–100. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.13>
- Condon, L. A., & Pyke, D. A. (2016). Filling the interspace-restoring arid land mosses: source populations, organic matter, and overwintering govern success. *Ecology and Evolution*, 6(21), 7623–7632. <https://doi.org/10.1002/ece3.2448>
- Eldridge, D. J. (1993). Cryptogam cover and soil surface condition: Effects on hydrology on a semiarid woodland soil. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 7(3), 203–217. <https://doi.org/10.1080/15324989309381351>
- Gao, S., Ye, X., Chu, Y., & Dong, M. (2010). Effects of biological soil crusts on profile distribution of soil water, organic carbon and total nitrogen in Mu Us Sandland, China. *Journal of Plant Ecology*, 3(4), 279–284. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtq015>
- Gaytan Jimenez, S. (2011). *Evaluación ecológica de las terrazas aluviales del valle de Zapotitlan de las Salinas, Puebla*. Universidad Nacional Autonoma de México.
- Heckman, K. A., Anderson, W. B., & Wait, D. A. (2006). Distribution and activity of hypolithic soil crusts in a hyperarid desert (Baja California, Mexico). *Biology and Fertility of Soils*, 43(2), 263–266. <https://doi.org/10.1007/s00374-006-0104-7>
- Jiménez-Aguilar, A. (2005). *Caracterización funcional de costras biológicas de suelo en un pastizal semiárido de San Luis Potosí*. IPICYT, a.c. Tesis de licenciatura.
- Jimenez-Aguilar, A., Huber-Sannwald, E., Belnap, J., Smart, D. R., & Moreno-Arredondo, J. T. (2009). Biological soil crusts exhibit a dynamic response to seasonal rain and release from grazing with implications for soil stability. *Journal of Arid Environments*, 73, 1158–1169. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.05.009>
- López-Cortés, A., Maya, Y., & García-Maldonado, J. Q. (2010). Phylogenetic diversity of Microcoleus species from biological desert crusts of the Baja California Peninsula, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81, 1–7.

- Maestre, F. T. (2003). Variaciones en el patrón espacial a pequeña escala de los componentes de la costra biológica en un ecosistema mediterráneo semiárido. *Revista chilena de historia natural*, 76(1), 35–46. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2003000100004>
- Maestre, F. T., Bowker, M. A., Cantón, Y., Castillo-Monroy, A. P., Cortina, J., Escolar, C., ... Martínez, I. (2011). Ecology and functional roles of biological soil crusts in semi-arid ecosystems of Spain. *Journal of Arid Environments*, 75(12), 1282–1291. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.12.008>
- Maya, Y., López-Cortés, A., & Soeldner, A. (2002). Cyanobacterial microbiotic crusts in eroded soils of a tropical dry forest in the Baja California Peninsula, Mexico. *Geomicrobiology Journal*, 19(5), 505–518. <https://doi.org/10.1080/01490450290098469>
- Mendoza-Aguilar, D. O., Cortina, J., & Pando-Moreno, M. (2014). Biological soil crust influence on germination and rooting of two key species in a *Stipa tenacissima* steppe. *Plant and Soil*, 375(1–2), 267–274. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1958-8>
- Quiñones-Vera, A., José, J., Manuel, C., José, J., Abel, C., Mexicana de la Ciencia del Suelo, S., & Chapingo, A. (2009). Efecto de la costra biológica sobre la infiltración de agua en un pastizal. *Terra Latinoamericana*, 27(4), 287–293.
- Rivera-Aguilar, V., Godínez-Alvarez, H., Moreno-Torres, R., & Rodríguez-Zaragoza, S. (2009). Soil physico-chemical properties affecting the distribution of biological soil crusts along an environmental transect at Zapotitlán drylands, Mexico. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.05.003>
- Rivera-Aguilar, V., Montejano, G., Rodríguez-Zaragoza, S., & Durán-Díaz, A. (2006). Distribution and composition of cyanobacteria, mosses and lichens of the biological soil crusts of the Tehuacán Valley, Puebla, México. *Journal of Arid Environments*, 67(2), 208–225. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.013>
- Sandoval Pérez, A. L., Camargo-Ricalde, S. L., Montañón, N. M., García-Oliva, F., Alarcón, A., Montañón-Arias, S. A., & Esperón-Rodríguez, M. (2016). Biocrusts, inside and outside resource islands of *Mimosa luisana* (Leguminosae), improve soil carbon and nitrogen dynamics in a tropical semiarid ecosystem. *European Journal of Soil Biology*, 74(November), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.03.006>
- Weber, B., Büdel, B., & Belnap, J. (Eds.). (2016). *Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands* (Vol. 226). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0>
- Zhuang, W., Serpe, M., & Zhang, Y. M. (2015). The effect of lichen-dominated biological soil crusts on growth and physiological characteristics of three plant species in a temperate desert of northwest China. *Plant Biology*, 17(6), 1165–1175. <https://doi.org/10.1111/plb.12359>



Capítulo 2

Revisión de literatura

Las Costras Biológicas del Suelo (biocostras) constituyen una de las propiedades bioedáficas más importante en los ecosistemas áridos y semiáridos, donde las condiciones climáticas limitan el desarrollo y distribución de plantas vasculares; las biocostras son micro comunidades que habitan en la superficie y dentro del suelo, creando una costra que puede llegar a ser milimétrica o hasta varios centímetros. Esta micro comunidad es la primera en colonizar nuevos ecosistemas, así como la primera en establecerse en ambientes degradados y perturbados (Maestre, 2003; Veste, 2005; Yoshitake *et al.*, 2010); además, los organismos que habitan en la costra son muy resistentes a las altas y bajas temperaturas, a los largos períodos de desecación y a la excesiva radiación, respondiendo rápidamente a los cambios momentáneos de las condiciones micro ambientales (Lange, 2001).

En estas microcomunidades, en particular, las cianobacterias y algas verdes son responsables de la formación de la costra (Büdel, Dulić, Darienko, Rybalka, & Friedl, 2016); especies filamentosas como *Nostoc* y *Microcoleus*, así como *Klebsormidium* y *Zigogonium* son consideradas como las iniciadoras del proceso de encostramiento. En este proceso, las cianobacterias filamentosas exudan exopolisacáridos (EPSs), que estabilizan a las partículas y capas sub-superficiales del suelo y las conserva unidas, posteriormente ricinas de líquenes, rizoides y protonemas de musgos terminan el proceso de formación de las biocostras (Veste et al. 2011).

Las CBSs se clasifican de acuerdo a su composición taxonómica, los principales grupos son cianobacterias, briofitas, y líquenes, en asociación con microhongos, algas verdes, bacterias y micro artrópodos, que interactúan en los primeros centímetros de la superficie

del suelo (Briggs y Morgan 2008; Liu et al. 2009). Los organismos que conforman a las biocostras, son considerados consorcios de vida extremadamente larga, por lo que pueden proveer servicios ecosistémicos continuos (Castillo-Monroy y Maestre, 2011).

Dentro de los servicios ecosistémicos que las biocostras proporcionan, se estima que son las responsables del 7% del ingreso de carbono (C) de la vegetación terrestre total y ~45% del total de nitrógeno (N) fijado biológicamente (Elbert et al., 2012). Dentro del ciclo del C, las biocostras ejercen un papel clave, ya que fijan dióxido de carbono (CO₂) atmosférico y liberan cerca de 50% al suelo por lixiviación y descomposición, aumentando hasta tres veces el carbono orgánico del suelo (COS) respecto al suelo sin biocostras, debido a su rápida respuesta a la humedad que potencia los flujos del C y la transformación de los nutrimentos en el suelo (Montaño et al., 2016). Con respecto al ciclo del nitrógeno, el N₂ atmosférico es fijado por cianobacterias como *Nostoc* y *Scytonema*, y cianolíquenes (liquen con una cianobacteria como fotobionte) presentes en las biocostras, siendo la fuente dominante de N en regiones áridas (Belnap, 2002), sin embargo, no todas las especies de cianobacterias presentan heterocisto (célula especializada en la fijación de N₂), por lo que la fijación de nitrógeno en biocostras con cianobacterias que no presentan heterocisto como *Microcoleus* y *Phormidium*, esta relaciona a la presencia de bacterias en la biocostra (Steppe, Olson, Paerl, Litaker, & Belnap, 1996). Las cianobacterias, asimismo, pueden vivir de manera epífita sobre musgos y clorolíquenes (liquen con alga verde por fotobionte) de las biocostras, por lo que este consorcio igualmente presenta actividad fijadora de N (Peters, Toia, Calvert, & Marsh, 1986).

Respecto al ciclo del fósforo (P), se considera que la presencia de la biocostra aumenta potencialmente el P disponible, debido a un aumento en la materia orgánica. La actividad de los organismos de la biocostra puede aumentar aún más la disponibilidad de P dependiendo de la composición de las especies de la biocostra. Por ejemplo, la excreción de H⁺ durante la respiración o la secreción de ácidos orgánicos puede solubilizar carbonatos y unir a P con Fe y Al (Belnap, 2011); un aumento en el pH puede conducir a la liberación de P junto con Fe y Al (Blume et al., s/f; Garcia-Pichel & Belnap, 1996). Las fosfatasas, que existen en las paredes celulares y en las vainas mucilaginosas de la mayoría de los organismos de la biocostra, hidrolizan los fosfatos orgánicos liberadores de P (Nannipieri, Giagnoni, Landi, & Renella, 2011). Todos estos diferentes mecanismos contribuyen al papel esencial de la biocostra en la acumulación y el suministro de P a plantas vasculares, proveniente de fuentes orgánicas e inorgánicas. Algunos estudios demuestran que el contenido total de P encontrado en los talos de los líquenes presentes en biocostras, depende totalmente de la disponibilidad de P en el suelo (Delgado-Baquerizo et al., 2015). Schulz, Mikhailiuk, Dreßler, Leinweber, & Karsten (2016) encontraron que el único factor significativo que afecta la presencia de cianobacterias y algas en biocostras en dunas costeras fue el contenido total de P en la arena.

Algunos otros servicios ecosistémicos que proveen las biocostras, son el mejoramiento de la estabilidad del suelo (Belnap, 2003), controlan la erosión del suelo, por ejemplo, Rodríguez-Caballero et al. (2013), reportan que en los sitios donde removieron a las biocostras, se presentaron las mayores tasas de escorrentía y erosión, contrario, a los sitios donde la biocostra estuvo dominada por líquenes, obtuvieron las menores tasas de erosión. En los procesos hidrológicos, de igual manera las biocostras tienen una gran

influencia, regulan la entrada y pérdida de agua lo que disminuye el escurrimiento al mejorar la rugosidad del suelo, también se les atribuye una alta capacidad de retención de agua lo que modifica la porosidad del suelo resultando una menor evaporación, aumentando la humedad del suelo en comparación con áreas sin ninguna cobertura (Belnap, 2006; Li et al., 2016; Chamizo et al., 2016); asimismo, se les ha relacionado con la germinación y crecimiento de plantas vasculares y cactáceas (Rivera-Aguilar et al. 2005; Beyschlag et al. 2008; Godínez-Alvarez et al., 2011; Pando-Moreno et al. 2014).

No obstante, estas capacidades y ventajas atribuibles a las biocostras están fuertemente condicionadas a la composición de los organismos de cada costra. Por lo que caracterizar y describir las micro comunidades de las biocostras es fundamental para comprender la ecología y dinámica de los ecosistemas áridos y semiáridos.

Una primera caracterización de la composición y que es aplicable en campo es la propuesta por Eldridge y Rosentreter (1999), donde se clasifican a las biocostras a nivel de grupo morfológico. Büdel et al. (2009) utilizó este mismo enfoque en Sudáfrica y el sur de Namibia, utilizando una clasificación de biocostras basada en diferentes composiciones taxonómicas, resultando siete tipos de biocostras: costra de cianobacteria clara, costra de cianobacteria negra, costra de cianobacteria con cianolíquenes, costra de cianobacteria con cianolíquenes y/o clorolíquenes, costra con briofitas, costra hipolítica y una costra única dominada por líquenes del desierto de Namib. Otra clasificación de biocostras más reciente y basándose en las dos anteriores, es la propuesta por Williams et al., (2017), donde la caracterización de las biocostras es a nivel de grupo funcional: cianobacteria, algas verdes, clorolíquenes, cianolíquenes y briofitas, con la cual se puede calcular cual es el porcentaje de cobertura de cada grupo funcional.

Aunque estas clasificaciones, son muy útiles y factibles de obtener en campo, para comprender mejor el papel ecológico de la biocostra en su ecosistema, lo mejor es identificar a nivel de familia o género, y en el mejor caso a especie, los organismos que habitan en la costra; ya que, para determinar las interacciones existentes, así como la aportación en la fijación de carbono y nitrógeno y el resto de servicios ecosistémicos que proporcionan, una determinación taxonómica más profunda es indispensable .

El estudio de los microorganismos presentes en las biocostras se ha abordado de diferentes aspectos, en la mayoría de los casos, las investigaciones se han centrado en uno o algunos grupos de organismos (cianobacterias, algas, micro hongos, líquenes y briofitas), excluyendo a otros grupos que también cohabitan en la costra como bacterias (incluyendo actinomicetos), hongos, protistas y micro invertebrados (Büdel, 2005).

En México, los estudios sobre biocostras han sido escasos, frecuentemente solo enfocan en algunos grupos funcionales; por ejemplo, Flechtner, Johansen, & Clark (1998) fueron los primeros en analizar los diferentes organismos en las Costras Microbióticas (Loope & Gifford, 1972) en la parte central de la Península de Baja California, realizando un estudio de la composición de algas presentes en las costras, reportando 66 especies de algas agrupadas en 32 géneros siendo los grupos conformados por cianobacterias y algas verdes los que concentraron la mayor diversidad y abundancia de especies. Otro estudio realizado en el sur de la Península de Baja California (Maya, López-Cortés, & Soeldner, 2002) estuvo orientado a la diversidad de cianobacterias asociadas a las biocostras, reportando seis especies y su capacidad de fijación de nitrógeno.

Algunos otros estudios se concentraron en la relación existen entre la presencia de las biocostras y la germinación de semillas de plantas vasculares y cactáceas. (Mendoza,

2014; Pando-Moreno, Molina, Jurado, & Flores, 2014b; Rivera-Aguilar, Godínez-Álvarez, Manuell-Cacheux, & Rodríguez-Zaragoza, 2005). En el altiplano mexicano, se ha estudiado la asociación biocostra en pastizales, y su papel como bioindicadores de la salud del ecosistema (Jiménez-Aguilar, 2005), así como su participación en los procesos de infiltración (Quiñones-Vera et al., 2009).

Al conocer la composición taxonómica de las biocostras proporcionará información sobre su efecto en la estabilidad del suelo, concentración de nutrientes, y pueden ser considerados como indicadores en áreas perturbadas, como zonas con pastoreo. El desafío hoy en día de la investigación sobre biocostras es conocer y entender a profundidad los componentes que la conforman, para avanzar en el conocimiento de sus complejas relaciones y asociaciones con el ecosistema (Concostrina-Zubiri, 2013).

Finalmente, esta investigación, parte de la identificación de la composición de las biocostras, específicamente, algas verdes, cianobacterias y líquenes, a través de un gradiente altitudinal en el extremo sur del Desierto Chihuahuense.

2.1 Referencias

- Belnap, J. (2002). Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA. *Biology and Fertility of Soils*, 35(2), 128–135. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0452-x>
- Belnap, J. (2003). The world at your feet: desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(4), 181–189. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001)
- Belnap, J. (2006). The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes*, 20(15), 3159–3178. <https://doi.org/10.1002/hyp.6325>
- Belnap, J. (2011). Biological Phosphorus Cycling in Dryland Regions (pp. 371–406). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9_15
- Belnap, J., Kaltenecker, J. H., Rosentreter, R., Williams, J., Leonard, S., & Eldridge, D. (2001). *Biological Soil Crusts: Ecology and Management*. Washington, D.C:
- Beyschlag, W., Wittland, M., Jentsch, A., & Steinlein, T. (2008). Soil crusts and disturbance benefit plant germination, establishment and growth on nutrient deficient sand. *Basic and Applied Ecology*, 9(3), 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2007.03.002>
- Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., ... Wilke, B.-M. (s/f). Scheffer/Schachtschabel soil science.
- Briggs A., Morgan J. W. (2008) Morphological diversity and abundance of biological soil crusts differ in relation to landscape setting and vegetation type. *Australian Journal of Botany* 56, 246-253. <https://doi.org/10.1071/BT07194>
- Büdel, B. (2005). Microorganisms of Biological Crusts on Soil Surfaces. En *Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions* (pp. 307–323). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/3-540-26609-7_15
- Büdel, B., Darienko, T., Deuschewitz, K., Dojani, S., Friedl, T., Mohr, K. I., ... Weber, B. (2009). Southern African Biological Soil Crusts are Ubiquitous and Highly Diverse in Drylands, Being Restricted by Rainfall Frequency. *Microbial Ecology*, 57(2), 229–247. <https://doi.org/10.1007/s00248-008-9449-9>
- Büdel, B., Dulić, T., Darienko, T., Rybalka, N., & Friedl, T. (2016). Cyanobacteria and Algae of Biological Soil Crusts (pp. 55–80). https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_4
- Chamizo, S., Belnap, J., Eldridge, D. J., Cantón, Y., & Malam Issa, O. (2016). The Role of Biocrusts in Arid Land Hydrology (pp. 321–346). https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_17
- Delgado-Baquerizo, M., Gallardo, A., Covelo, F., Prado-Comesaña, A., Ochoa, V., & Maestre, F. T. (2015). Differences in thallus chemistry are related to species-specific effects of biocrust-forming lichens on soil nutrients and microbial communities. *Functional Ecology*, 29(8), 1087–1098. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12403>
- Eldridge, D. J., & Rosentreter, R. (1999). Morphological groups: a framework for monitoring microphytic crusts in arid landscapes. *Journal of Arid Environments*.
- Flechtner, V. R., Johansen, J. R., & Clark, W. H. (1998). Algal composition of microbiotic crusts from the Central Desert of Baja California, Mexico. *Western North American Naturalist*, 58(October 2015), 295–311. <https://doi.org/10.2307/41713069>
- García-Pichel, F., & Belnap, J. (1996). Microenvironments and microscale productivity of cyanobacterial desert crusts. *Journal of Phycology*, 32(5), 774–782. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1996.00774.x>

- Godínez-Alvarez, H., Morín, C., & Rivera-Aguilar, V. (2011). Germination, survival and growth of three vascular plants on biological soil crusts from a Mexican tropical desert. *Plant Biology*, 14(1), no-no. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2011.00495.x>
- Jiménez-Aguilar, A. (2005). Caracterización funcional de costras biológicas de suelo en un pastizal semiárido de San Luis Potosí. Tesis de maestría. IPICYT A.C.
- Li, B., Gao, J., Wang, X., Ma, L., Cui, Q., & Vest, M. (2016). Effects of biological soil crusts on water infiltration and evaporation Yanchi Ningxia, Maowusu Desert, China. *International Journal of Sediment Research*, 31, 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.05.005>
- Liu, H., Xingguo H., Li, L., Huang, J., Liu, H. & Li, X. (2009) Grazing Density Effects on Cover, Species Composition, and Nitrogen Fixation of Biological Soil Crust in an Inner Mongolia Steppe Rangeland *Ecology & Management* 62 (4), 321-327. <https://doi.org/10.2111/08-179.1>
- Loope, W. L., & Gifford, G. F. (1972). Influence of a soil microfloral crust on select properties of soils under pinyon-juniper in southeastern Utah. *Journal of soil and water conservation*, 27, 164–167.
- Maya, Y., López-Cortés, A., & Soeldner, A. (2002). Cyanobacterial microbiotic crusts in eroded soils of a tropical dry forest in the Baja California Peninsula, Mexico. *Geomicrobiology Journal*, 19(5), 505–518. <https://doi.org/10.1080/01490450290098469>
- Mendoza, D. (2014). Costras biológicas del suelo en ecosistemas semiáridos: composición, rendimiento fisiológico y efecto en la germinación de plantas. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García-Oliva, F., García-Sánchez, R., ... Yépez, E. (2016). Alamcenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34, 39–59.
- Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L., & Renella, G. (2011). Role of Phosphatase Enzymes in Soil (pp. 215–243). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9_9
- Pando-Moreno, M., Molina, V. Í., Jurado, E., & Flores, J. (2014). Effect of Biological Soil Crusts on the seed Germination of Three Plant Species Under Laboratory Conditions. *Botanical Sciences*, 92(2), 273–279.
- Peters, G. A., Toia, R. E. J., Calvert, H. E., & Marsh, B. H. (1986). Lichens to Gunnera – with emphasis on Azolla. *Plant Soil*, 90, 17–34.
- Quiñones-Vera, A., José, J., Manuel, C., José, J., Abel, C., Mexicana de la Ciencia del Suelo, S., & Chapingo, A. (2009). Efecto de la costra biológica sobre la infiltración de agua en un pastizal. *Terra Latinoamericana*, 27(4), 287–293.
- Rivera-Aguilar, V., Godínez-Alvarez, H., Manuell-Cacheux, I., & 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(1), 344–352. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.012>
- Rivera-Aguilar, V., Godínez-Alvarez, H., Manuell-Cacheux, I., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.012>
- Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y., Chamizo, S., Lázaro, R., Escudero, A., & Escudero, A. (2013). Soil Loss and Runoff in Semiarid Ecosystems: A Complex Interaction Between Biological Soil Crusts, Micro-topography, and Hydrological Drivers Ecosystems: 16(4), 529–546. <https://doi.org/10.1007/s>
- Schulz, K., Mikhailyuk, T., Dreßler, M., Leinweber, P., & Karsten, U. (2016). Biological Soil Crusts from Coastal Dunes at the Baltic Sea: Cyanobacterial and Algal Biodiversity and Related Soil Properties. *Microbial Ecology*, 71(1), 178–193. <https://doi.org/10.1007/s00248-015-0691-7>

- Steppe, T., Olson, F., Paerl, J. B., Litaker, H. W., & Belnap, J. (1996). Consortial N₂ fixation: a strategy for meeting nitrogen requirements of marine and terrestrial cyanobacterial mats. *FEMS Microbiol Ecol*, 21, 149–156.
- Veste, M., Breckle, S.-W., Eggert, K., & Littmann, T. (2011). Vegetation pattern in arid sand dunes controlled by biological soil crusts along a climatic gradient in the Northern Negev desert. *Basic and Applied Dryland Research*, 5(1), 1–16. <https://doi.org/10.1127/badr/5/2011/1>
- Weber, B., Büdel, B., & Belnap, J. (Eds.). (2016). *Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands* (Vol. 226). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0>
- Williams, L., Borchhardt, N., Colesie, C., Baum, C., Komsic-Buchmann, K., Rippin, M., ... Büdel, B. (2017). Polar Biology Biological Soil Crusts of Arctic Svalbard and of Livingston Island. *Polar Biology*, 40(2), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00300-016-1967-1>.



Capítulo 3

Composición de las Costras Biológicas del Suelo del Semidesierto Queretano en la Región Meridional del Desierto Chihuahuense

Núñez-Solano, K. E. ¹, Granados-Sánchez, D^{1*}, Granados-Victorino R.L.², Escalante-Vargas I.², Santiago-Elena, E.²; Barrera-Zubiaga, E.¹

Universidad Autónoma Chapingo, ¹División de Ciencias Forestales, ²Preparatoria Agrícola.

Km. 38.5 Carretera México-Texcoco. C.P. 56230. Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding autor: didorog@hotmail.com, tel: +52 (595) 9521500 ext. 5331

Resumen

En México, cerca del 60% del territorio corresponde a zonas áridas y semiáridas, donde el Desierto Chihuahuense (DC) es el que ocupa la mayor superficie del país; y es considerado el desierto con mayor superficie en Norte América, se divide en tres regiones: Principal, Central y Meridional. Una de las características bioedáficas más importantes en las regiones áridas son las Costras Biológicas del Suelo (CBSs), micro comunidades localizadas en los primeros milímetros del suelo, conformadas por algas, bacterias, hongos, cianobacterias, líquenes, briofitas y micro artrópodos. Este estudio es el primero que se realiza en el área del Semidesierto Queretano. Se colectaron CBSs a través de un gradiente altitudinal (1200-1900 msnm) y en dos microambientes (Biocostra expuesta totalmente y Biocostra debajo de vegetación). Un total de 39 especies fueron registradas, nueve especies de algas, 14 especies de cianobacteria y 15 especies líquenes y tres morfo tipos de musgos. Tanto algas verdes como cianobacterias estuvieron presentes en todos los sitios, siendo las especies *Myrmecia* sp. y *Scytonema* sp. las más abundantes, respectivamente. El liquen *Placidium squamulosum* fue el más abundante en todos los sitios, seguido de *Collema* sp., *Endocarpon pallidum*, y *Peltulla obscurans*. La composición de especies no se vio afectada por el microambiente, pero si por el sitio. El análisis clúster muestra que hay diferencias entre la composición de las especies de las regiones áridas de México; el Semidesierto Queretano comparte similitud con otros sitios del DC, a pesar de los registros únicos de varias especies en las CBSs muestreadas.

Palabras clave: biocostras, regiones áridas mexicanas; líquenes, cianobacterias

Composition of the Biological Crusts of the Queretaroan Semidesert Soil in the Meridional Region of the Chihuahuan Desert

Nuñez-Solano, K.E.¹, Granados-Sánchez, D.^{1*}, Granados-Victorino R.², Escalante-Vargas I.², Santiago-Elena, E.²; Barrera-Zubiaga, E.¹

Universidad Autónoma Chapingo, ¹División de Ciencias Forestales, ²Preparatoria Agrícola.

Km. 38.5 Carretera México-Texcoco. C.P. 56230. Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding autor: didorog@hotmail.com, tel: +52 (595) 9521500 ext. 5331

Abstract

About 60% of Mexican territory is either an arid or semi-arid zone. The Chihuahuan Desert (CD) occupies the largest arid area in the country; and it is considered the largest desert in North America. It is divided into three regions: Central, Oriental and Meridional. One of the most important bio-edaphic characteristics in the arid regions are the Biological Soil Crusts (BSCs): micro communities located in the first millimeters of the soil formed by algae, bacteria, fungi, cyanobacteria, lichens, bryophytes and micro arthropods. This is the first study carried out in the Queretaroan Semidesert area. BCSs were collected through an altitudinal gradient (1200-1900 masl) and in two microenvironments (Biocrust totally exposed and Biocrust under vegetation). A total of 39 species were recorded: 9 algae, 14 cyanobacteria and 15 lichens, and three morpho types of mosses. Green algae and cyanobacteria were present in all sites. The species *Myrmecia* sp. and *Scytonema* sp. were the most abundant, respectively. *Placidium squamulosum* was the most abundant lichen in all sites, followed by *Collema* sp., *Endocarpon pallidum*, and *Peltulla obscurans*. The composition of species was affected by the site rather than by the microenvironment. The cluster analysis shows that there are differences between the composition of the species of the arid regions of Mexico. The Queretaroan Semidesert shares similarity with other CD sites, despite the different species' single records of the sampled BSCs.

Key words: biocrusts, arid mexican regions, lichens, cianobacteria

1. Introducción

Las zonas áridas y semiáridas representan alrededor del 60% de la superficie de México, debido a que se encuentra situado entre los 20° y los 40° N, además de verse afectado por la continentalidad y sombra orográfica, resultando que gran parte del territorio está sujeto a condiciones de aridez (Huerta-Martínez *et al.*, 2010; Granados-Sánchez, Hernández-García y López-Ríos, 2012).

En México se localizan 4 grandes regiones áridas: el Desierto de Sonora y Baja California, el Desierto Chihuahuense, la región árida Tamaulipeca y el valle de Tehuacán-Cuicatlán en los estados de Puebla y Oaxaca (Dinerstein *et al.*, 2001; Hernández, Gómez-Hinostrosa y Goettsch, 2004; Abd El-Ghani *et al.*, 2017).

El Desierto Chihuahuense (DC) es el desierto con mayor extensión del continente americano, con una superficie de 647,500 km², comprende desde el sureste de Arizona, el sur de Nuevo México y el oeste de Texas en los Estados Unidos de América y en México continúa por algunas regiones del estado de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango y se extiende hacia el sur hasta los estados de San Luis Potosí, Querétaro e Hidalgo, se encuentra rodeado al oeste por la Sierra Madre Occidental y al este por la Sierra Madre Oriental; es considerado como una de las regiones áridas con mayor riqueza y diversidad de especies del mundo (Dinerstein *et al.*, 2001; Hoyt, 2002). El DC está conformado por 3 sub regiones, basadas en la distribución de las especies de cactáceas endémicas (Hernández y Gómez-Hinostrosa, 2005); la región Principal, la Meridional y la Oriental.

El DC alberga la mayor riqueza de especies de cactáceas (329 sp.) del mundo, cerca del 70% de las especies son endémicas, siendo los géneros *Mammillaria*, *Opuntia*, *Coryphantha* y *Echinocereus* los que abarcan aproximadamente el 60% de la diversidad de cactáceas de la región (Hernández, Gómez-Hinostrosa, & Goettsch, 2004); así como una gran diversidad de fauna, registrándose más de 100 especies de mamíferos como el berrendo (*Antilocapra americana*, Ord, 1815), jaguar (*Panthera onca*, Linnaeus, 1758.) y el pecarí de collar (*Dicotyles tajacu*, Linnaeus, 1758), así como más de 100 especies de reptiles incluyendo varias lagartijas endémicas como (*Coleonyx brevis*, Stejneger,

1893 y *C. reticulatus*, Davis & Dixon, 1958) (Degenhardt, Painter y Price, 1996) entre las serpientes se encuentran (*Elaphe subocularis* (Brown, 1901), *Thamnophis eques* (Reuss, 1834), *Coluber taeniatus* (Hallowell, 1852) y *Coluber flagellum lineatulus* (H. M. Smith, 1941) (Brown, 1994) y algunas tortugas nativas como (*Gopherus flavomarginatus* Legler, 1959 y *Terrapene coahuila* Schmidt & Owens, 1944) además de un gran número de especies de aves (250), anfibios (25) y mariposas (250) (Dinerstein *et al.*, 2001).

De acuerdo con Rzedowski (1965, 2006) existen 3 tipos básicos de vegetación en el DC; el matorral desértico micrófilo de suelos de aluvión, matorral desértico rosetófilo en rocas calizas y terrenos de buen drenaje y matorral desértico crassicaule ligado a rocas y suelos de naturaleza ígnea. Granados-Sánchez *et al.*, (2011) reportan las principales asociaciones en el DC siendo matorral micrófilo de *Larrea tridentata* (DC.) Coville, matorral rosetófilo de *Agave lecheguilla* Torr., matorral rosetófilo de *Dasyllirion* spp. pastizal, chaparral, nopalera, mezquital, izotal, vegetación de dunas y vegetación halófila.

1.1 Biocostras

Uno de los componentes bióticos más importante en las zonas áridas y semiáridas son las Costras Biológicas del Suelo (biocostras), microcomunidades localizadas en los primeros milímetros del suelo creando una íntima asociación con briofitas, líquenes, cianobacterias, algas, bacterias, hongos y micro artrópodos (Belnap *et al.* 2001; Maestre *et al.* 2016; Belnap, Weber, & Büdel 2016).

Las Costras Biológicas del Suelo (CBSs) juegan un papel sumamente importante en la dinámica ecológica y funcionamiento de las regiones áridas y semiáridas del mundo; las biocostras son las primeras en colonizar nuevos ecosistemas, así como las primeras que se presentan en ambientes degradados (Veste, 2005). Las Costras Biológicas, conglomerado de organismos fotoautótrofos, participan activamente en el ciclo del carbono y nitrógeno (Beymer y Klopatek, 1991; Bowker *et al.*, 2011; Strauss *et al.*, 2012; Delgado-Baquerizo *et al.*, 2013; Maestre *et al.*, 2013; Barger *et al.*, 2016).

Además, las CBSs contribuyen en los procesos hidrológicos (Belnap, 2006; Li *et al.*, 2016; Chamizo *et al.*, 2016), mejoran la estructura física del suelo, por lo que favorecen el control de la erosión (Belnap & Gillette, 1998; Belnap & Lange, 2003; Belnap & Büdel,

2016). Asimismo, las biocostras influyen en la germinación y crecimiento de plantas vasculares y cactáceas (Rivera-Aguilar *et al.*, 2005; Beyschlag *et al.*, 2008; Godínez-Alvarez *et al.*, 2011; Pando-Moreno *et al.* 2014).

En este consorcio de microorganismos, en particular, las cianobacterias y algas verdes son responsables de la formación de la costra (Büdel *et al.*, 2016); especies filamentosas como *Nostoc* y *Microcoleus*, así como *Klebsormidium* y *Zigogonium* son consideradas como las iniciadoras del proceso de encostramiento. En este proceso, los filamentos de las cianobacterias exudan exopolisacáridos (EPSs), que estabilizan a las partículas de suelo y las mantiene unidas, posteriormente ricinas de líquenes, rizoides y protonemas de musgos terminan el proceso de formación de las biocostras (Veste *et al.*, 2011).

La información referente a las CBSs en México es muy escasa aún, se han realizado algunos estudios sobre biocostras; sin embargo, en su mayoría se han enfocado en ciertos grupo funcionales, como en las cianobacterias (Maya, López-Cortés y Soeldner, 2002; López-Cortés, Maya y García-Maldonado, 2010) o algas (Flechtner, Johansen y Clark, 1998); por otra parte algunos otros trabajos han incluido a más grupos funcionales como líquenes y musgos (Rivera-Aguilar *et al.*, 2006; Concostrina-Zubiri *et al.*, 2014).

En el caso del DC, los estudios son limitados, contemplando la extensión superficial que comprende el desierto (Jimenez-Aguilar *et al.*, 2009; Quiñones-Vera *et al.*, 2009; Concostrina-Zubiri *et al.*, 2013; Molina *et al.*, 2014), sin embargo la composición de especies de las CBS a través del espacio geográfico no es similar dentro del mismo desierto; por lo que el objetivo de este estudio fue determinar las comunidades de, líquenes, cianobacterias y algas presentes en el Semidesierto Queretano, en el extremo sur del desierto chihuahuense y compararlas con las especies reportadas en biocostras de otros desiertos mexicanos.

2. Materiales y métodos

2.1 Zona de estudio

La Sierra Gorda de Querétaro (21° 20' 0" N, 99° 40' 0" W), corresponde a la región Meridional del Desierto Chihuahuense en el centro de México; mejor conocida como el Semidesierto Queretano, presenta un clima semi seco templado con lluvias en verano, BS₁kw (García, 2004) con una temperatura media anual de 16-18°C y una precipitación media anual de 400-600 mm. La vegetación principal es matorral xerófilo, con algunas variantes del matorral como el micrófilo, rosetófilo y crasicale (Zamudio *et al.*, 1992; Rzedowski, Calderón De Rzedowski y Zamudio, 2012) donde las asociaciones más representativas son *Larrea tridentata* (DC.) Coville con *Fouquieria splendens* Engelm., *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst., *Celtis pallida* Torr., *Karwinskia humboldtiana* (Schult.) Zucc, *Fouquieria splendens* Engelm., *Acacia farnesiana* (L.) Willd, *Koeberlinia spinosa* Zucc. *Parthenium incanum* Kunth y cactáceas como *Lophophora diffusa* (Croizat) Bravo, *Stenocereus dumortieri* (Scheidw.) Buxb., *Myrtillocactus geometrizans* (Mart. ex Pfeiff.) y *Opuntia imbricata* (Haw.) DC.

2.2 Muestreo de biocostras

Las Costras Biológicas del Suelo se colectaron durante los meses de noviembre 2016 y octubre 2017 dentro del área denominada "cuadrante Tolimán" (20°30'21" N, 99°30'100.00" W) (Hernández-Oria, Chávez-Martínez y Sánchez-Martínez, 2007). Se seleccionaron 3 sitios para el muestreo, el primer sitio (SN) se ubicó en el extremo norte del Semidesierto Queretano (1300 msnm), el segundo sitio (SC) en la parte centro (1600 msnm) y el tercero (SS) en el sur (1900 msnm) (Figura 1); se colectaron 12 muestras por sitio, divididas en dos microambientes, i) Biocostra debajo de vegetación (BDV) y ii) Biocostra expuesta totalmente (BET). Cada costra fue recolectada utilizando una espátula para tomar una muestra de 10 x 10 cm del área central de la biocostra (Rivera-Aguilar *et al.*, 2006). Las muestras fueron colocadas en contenedores de plástico para su protección y traslado al laboratorio.

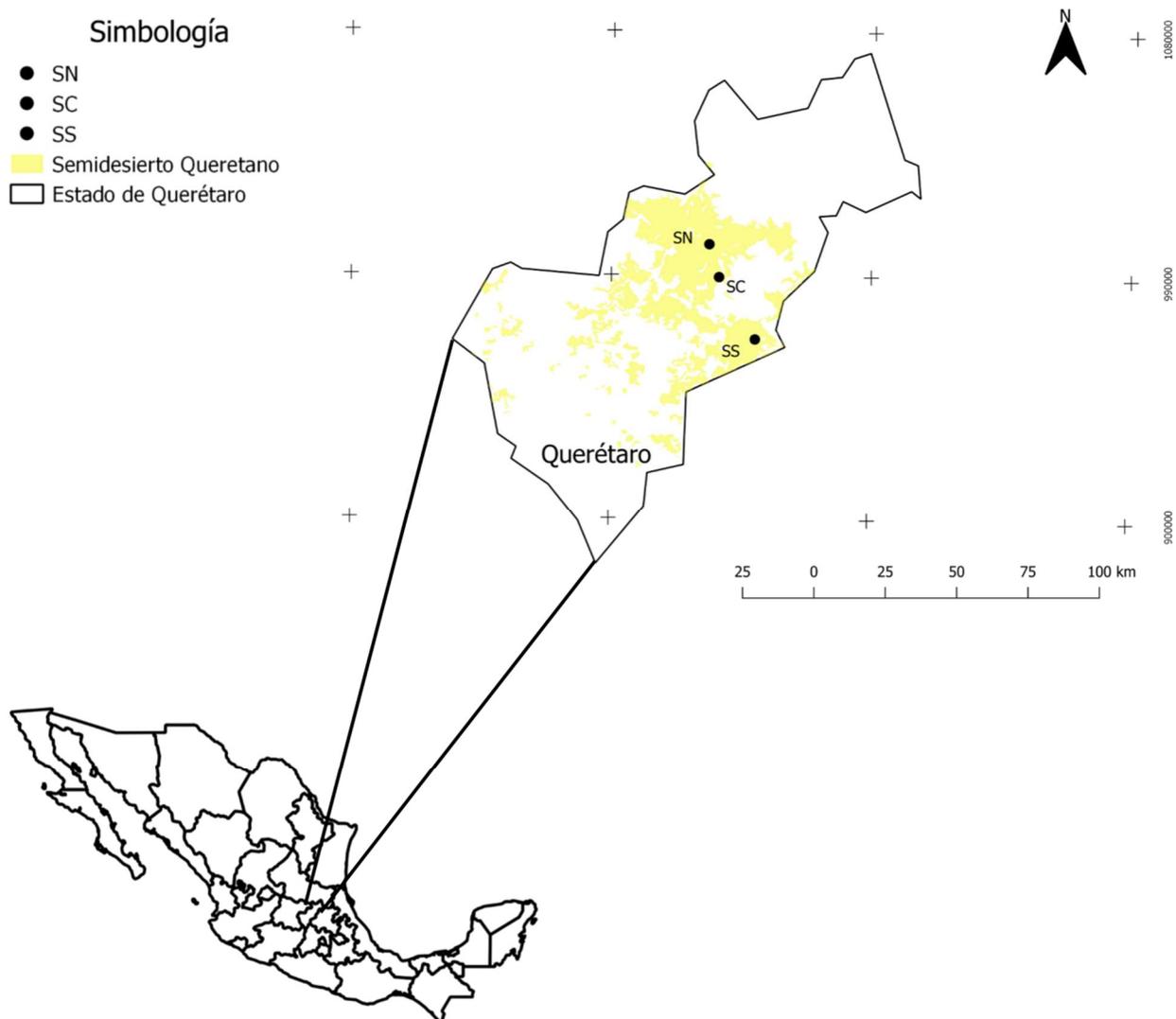


Fig. 1. Mapa de localización del área de estudio, se muestra los tres sitios de muestreo dentro de la región del Semidesierto Queretano, SN Sitio norte (1300 msnm); SC Sitio centro (1600 msnm) y SS Sitio Sur (1900 msnm).

2.3 Composición de las especies de biocostras

En laboratorio, las biocostras fueron hidratadas con agua destilada; líquenes y musgos fueron determinados taxonómicamente mediante observación microscópica. Se utilizó literatura especializada para su identificación (Brodo *et al.*, 2001; Nash III *et al.*, 2002; Nash *et al.*, 2004; McCune y Rosentreter, 2007; Rosentreter, Bowker y Belnap, 2007). Para visualizar la estructura interna de los talos de los líquenes, se realizaron secciones

con un micrótopo criogénico y un microscopio de luz con el software AxioVision (Carl Zeiss, Jena, Alemania).

Para el cultivo y aislamiento de cianobacterias se siguió la metodología propuesta por Jung *et al.*, (2018), misma que se aplicó para algas verdes. En la cual, se tomaron 250 mg de suelo de manera aleatoria de cada muestra y se incubó en 15 ml de Medio Basal Bold (BBM; Bischoff and Bold, 1963) toda la noche, posteriormente los tubos fueron mezclados y estabilizados por 30 segundos para que se sedimentaran las partículas de suelo. El sobrenadante fue decantado en un nuevo tubo y se le agregó nuevamente 15 ml de BBM, el procedimiento se repitió 3 veces, todo el sobrenadante resultante se combinó en un nuevo tubo resultando un total de 45 ml de BBM. Esta solución se centrifugó por 5 minutos a 1000 rpm. El sobrenadante se decantó y el pellet se resuspendió en 250 ml de agua doblemente destilada. Posteriormente 5 μL de la solución fue transferida a medio sólido BG11 y BBM con 2 réplicas por muestra. Los cultivos fueron almacenados en un cuarto de cultivo a 15-17° C bajo un régimen de luz/obscuridad de 14:10 hr con una intensidad de luz de 20-50 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ por 5 semanas; revisando el crecimiento de las algas y cianobacterias 3 veces por semana.

Una vez que el crecimiento de las colonias fue el adecuado, se examinaron con un microscopio de luz y objetivo de inmersión de 63x y el software AxioVision (Carl Zeiss, Jena, Alemania). Cianobacterias y algas verdes fueron determinadas taxonómicamente con las claves correspondientes (Komárek y Anagnostidis, 1998; Komárek y Anagnostidis, 2005; Komárek, 2013).

2.4 Análisis estadístico

La riqueza de especies para cada sitio y microambiente se registró en términos de las especies observadas. Se elaboró un análisis de conglomerados (método de Ward con el coeficiente Sørensen-Dice) para evaluar la composición de especies de algas, cianobacterias y líquenes entre microambientes (Biocostra-ET y Biocostra-DV).

Para comparar la diversidad presente en las biocostras entre los dos tipos de microambiente, se utilizó la riqueza de especies (Magurran, 2004), mediante la elaboración de curvas de rarefacción basadas en muestras con el software EstimateS 9.1

(Colwell, 2013). Las curvas de rarefacción estiman el número acumulado de especies en cada microambiente a medida que el tamaño del muestreo aumenta. La riqueza de especies para cada muestra se estimó realizando 1000 permutaciones aleatorias sin reemplazo. A los valores resultantes se les calculó sus intervalos de confianza al 95%. Para corroborar la integridad del muestreo, se calculó la riqueza de especies con el estimador Chao2, el cual se calcula como el número observado de especies más la relación entre el número de especies detectadas una (singletons) y dos (doubletons) en cada microambiente. Por lo tanto, Chao2 es considerado como un estimador de máxima verosimilitud de riqueza de especies y el grado en que esta métrica supera el número más alto de especies estimado mediante rarefacciones indica que tan exhaustivo fue el muestreo. El estimador Chao2 fue calculado 1000 veces para cada microambiente mediante rarefacción y se calculó su intervalo de confianza al 95%. Un inventario completo se asume cuando los intervalos de confianza al 95% del estimador, contiene el valor máximo de la riqueza de especies estimada en el número máximo de muestras en las curvas de rarefacción (Colwell, & Coddington 1994; Magurran, 2004).

Después de comparar la composición y riqueza de las biocostras entre microambientes y a través del gradiente altitudinal, la siguiente etapa fue evaluar la composición de especies reportadas en biocostras en México y posteriormente compararla con las especies reportadas en el presente estudio.

Para analizar la situación actual de las biocostras en México, se utilizó la información de estudios previamente publicados y relacionados con biocostras, la búsqueda se realizó con las palabras clave “Biocostras”, “Costras Biológicas del Suelo”, “Costras Microbióticas” y “México”. Se consideraron artículos publicados, así como, tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Solo tres grupos funcionales fueron considerados: cianobacterias, líquenes y musgos.

Se realizó un análisis de conglomerados para clasificar en grupos, las cuatro regiones áridas de México: la Península de Baja California, el Desierto Chihuahuense norte y centro y el valle de Tehuacán-Cuicatlán, a partir de las especies reportadas asociadas a biocostras, finalmente se complementó el listado con las especies detalladas en el presente estudio para el Semidesierto Queretano. La agrupación se realizó mediante el

método de Ward. Este índice está basado en datos de presencia-ausencia, donde valores iguales a 0% son totalmente similares y al 100% no se comparten especies (Magurran, 2004).

3. Resultados

3.1 Semidesierto Queretano

Las biocostras del Semidesierto Queretano, del presente estudio corresponden a la clasificación “Costra de cianobacterias con líquenes en estado sucesional tardío” (Büdel *et al.*, 2009) y aunque las briofitas no fueron dominantes en las muestras evaluadas, tanto hepáticas como musgos estuvieron presentes. En los tres sitios de muestreo, se identificaron 39 especies dentro de las biocostras, abarcando los dos microambientes: nueve algas verdes, 14 cianobacterias, 15 líquenes y tres morfo tipos de musgos.

Las algas verdes se presentaron en los tres sitios de muestreo (Tabla 1). El género *Myrmecia* sp. fue la más abundante, registrándose en todos los sitios; *Klebsormidium* sp., *Spongiochloris* sp., *Apatococcus* sp., *Chlorella* sp., *Coccomyxa* sp. y *Stichococcus* sp. también se encontraron en las biocostras, sin embargo, su distribución estuvo más limitada a un sitio o microambiente. *Mychonastes* sp. y *Neochlorosarcina* sp. fueron las especies más raras, ya que se solo fueron identificadas en un microambiente y en un sitio.

Con respecto a las cianobacterias, igualmente estuvieron presentes en todas las muestras. Se identificaron 14 géneros (Tabla 2), siendo el SN el más diverso con 12 especies, seguido del SC con ocho especies.

Tabla 1 Algas asociadas a biocostras en el sur del Desierto Chihuahuense.

Especies	SN		SC		SS	
	BET	BDV	BET	BDV	BET	BDV
Chlamydomonadales						
<i>Neochlorosarcina sp.</i>				+		
<i>Spongiochloris sp.</i>	+			+		
Chlorellales						
<i>Apatococcus sp.</i>		+	+			
<i>Chlorella sp.</i>		+	+			
Klebsormidiales						
<i>Klebsormidium sp.</i>	+		+		+	
Prasiolales						
<i>Stichococcus sp.</i>	+	+			+	
Sphaeropleales						
<i>Mychonastes sp.</i>			+			
Trebouxiales						
<i>Myrmecia sp.</i>		+	+	+	+	+
Trebouxiophyceae ordo incertae sedis						
<i>Coccomyxa sp.</i>		+	+	+		
Riqueza total de especies	3	5	6	4	3	1

SN: Sitio Norte, SC: Sitio Centro, SS: Sitio SS; MET: Microambiente expuesto totalmente, MDV: Microambiente debajo de vegetación.

El SS tuvo la menor riqueza con cuatro especies. El género *Scytonema sp.* fue el más abundante, se presentó en los tres sitios, con excepción del SN donde no se encontró en la BET; seguido de *Pseudophormidium sp.*, el cual se registró en ambos microambientes en el SN, sin embargo, solo se encontró en la BDV tanto en SC como en SS. Así mismo, pero con menor frecuencia las especies *Chroococciopsis sp.*, *Nostoc edaphicum*, *Nostoc microscopicum*, *Leptolyngbya sp.* *Phormidium sp.* y *Pseudoanabaena cf africanum* se registraron en dos de los tres sitios.

Algunas especies como *Microcoleus sp.*, *Oculatella sp.* y *Trichocoleus desertorum* sólo se encontraron en un sitio, sin embargo, estuvieron presentes en ambos microambientes. *Nostoc punctiforme*, *Scytonema cf. hyalinum* y *Schizothrix sp.* fueron las especies más raras, ya que su distribución se limitó a un solo microambiente.

Tabla 2 Cianobacterias asociadas a biocostras en el sur del Desierto Chihuahuense.

Especies	SN		SC		SS	
	BET	BDV	BET	BDV	BET	BDV
Chroococcidiopsidales						
<i>Chroococcidiopsis</i> sp.		+	+			
Nostocales						
<i>Nostoc edaphicum</i>	+	+		+		
<i>Nostoc microscopicum</i>		+				+
<i>Nostoc punctiforme</i>		+				
<i>Scytonema cf. hyalinum</i>		+				
<i>Scytonema</i> sp.		+	+	+	+	+
Oscillatoriales						
<i>Microcoleus</i> sp.	+	+				
<i>Oculatella</i> sp.			+	+		
<i>Phormidium</i> sp.	+	+		+		
<i>Pseudophormidium</i> sp.	+	+		+		+
Pseudanabaenales						
<i>Leptolyngbya</i> sp.		+				+
<i>Trichocoleus desertorum</i> sp.			+	+		
Synechococcales						
<i>Pseudoanabaena cf africanum</i>	+			+		
<i>Schizothrix</i> sp.		+				
Riqueza total de especies	5	11	4	7	1	4

SN: Sitio Norte, SC: Sitio Centro, SS: Sitio SS; BET: Biocostra expuesta totalmente, BDV: Biocostra debajo de vegetación.

En el caso de los líquenes, 10 géneros fueron encontrados, distribuidos en ocho familias (Tabla 3), siendo la familia Verrucariaceae, la que presentó la mayor cantidad de especies: *Endocarpon pallidum*, *Catapyrenium* sp., *Placidium* sp., *P. squamulosum*, *P. lachneum*.; la especie más abundante fue *P. squamulosum* la cual se registró en los tres sitios. El género *Psora* también estuvo presente en los tres sitios, sin embargo, su distribución fue muy particular, *Psora crenata* solo se reportó en las BET del SN y SC y *Psora decipiens* únicamente fue registrada en el SS y en un solo microambiente. Los líquenes *Catapyrenium* sp., *Caloplaca* sp. y *Toninia lutosa*, únicamente se registraron en el SN. De las 14 especies determinadas de líquenes, solo dos presentaron cianobacterias como fotobionte (*Collema* sp. y *Peccania* sp.), el resto son considerados como chloro líquenes al tener un alga verde. Sólo un líquen no pudo ser identificado, ya que no presentaba estructuras reproductivas, no obstante, este líquen fue el único que presentó

a *Trentepohlia* sp. como fotobionte, resultando el color del talo del liquen un rojo intenso y la capa algal de color naranja (Figura 3).

Los musgos estuvieron presentes en todos los sitios, tres diferentes morfotipos fueron los registradas, debido a la falta de estructuras reproductivas no fue posible la determinación taxonómica, por lo que se referirá a ellos mediante morfotipos. El musgo sp. 1 fue el más abundante registrado en el 83% de las muestras, distribuido en los tres sitios y en los dos microambientes, el musgo sp. 2 se encontró en el SN en los dos microambientes y en SC solo en la BET, musgo sp. 3 solo se encontró en el SN en ambos microambientes, sin embargo, fue más abundante en la BET.

Las curvas de rarefacción de los microambientes (BET y BDV) alcanzaron la asíntota con 7 muestreos (Figura 4a). Además, en ambos casos el intervalo de confianza de Chao2, contiene a los valores máximos de la riqueza de especies estimada en el número máximo de muestreos. Lo que indica que el esfuerzo de muestreo para cada microambiente fue lo suficientemente grande como para capturar la completamente la composición y diversidad de las especies de biocostras en los diferentes microambientes. De acuerdo con el estimador Chao2, en el microambiente BET se capturó el 91% de las especies y en el BDV el 87%. La comparación de las curvas de rarefacción indica que no hay diferencias significativas entre los dos microambientes. Sin embargo, la Biocostra debajo de vegetación (BDV) reportó mayor diversidad al presentar tres especies más con respecto a la BET.

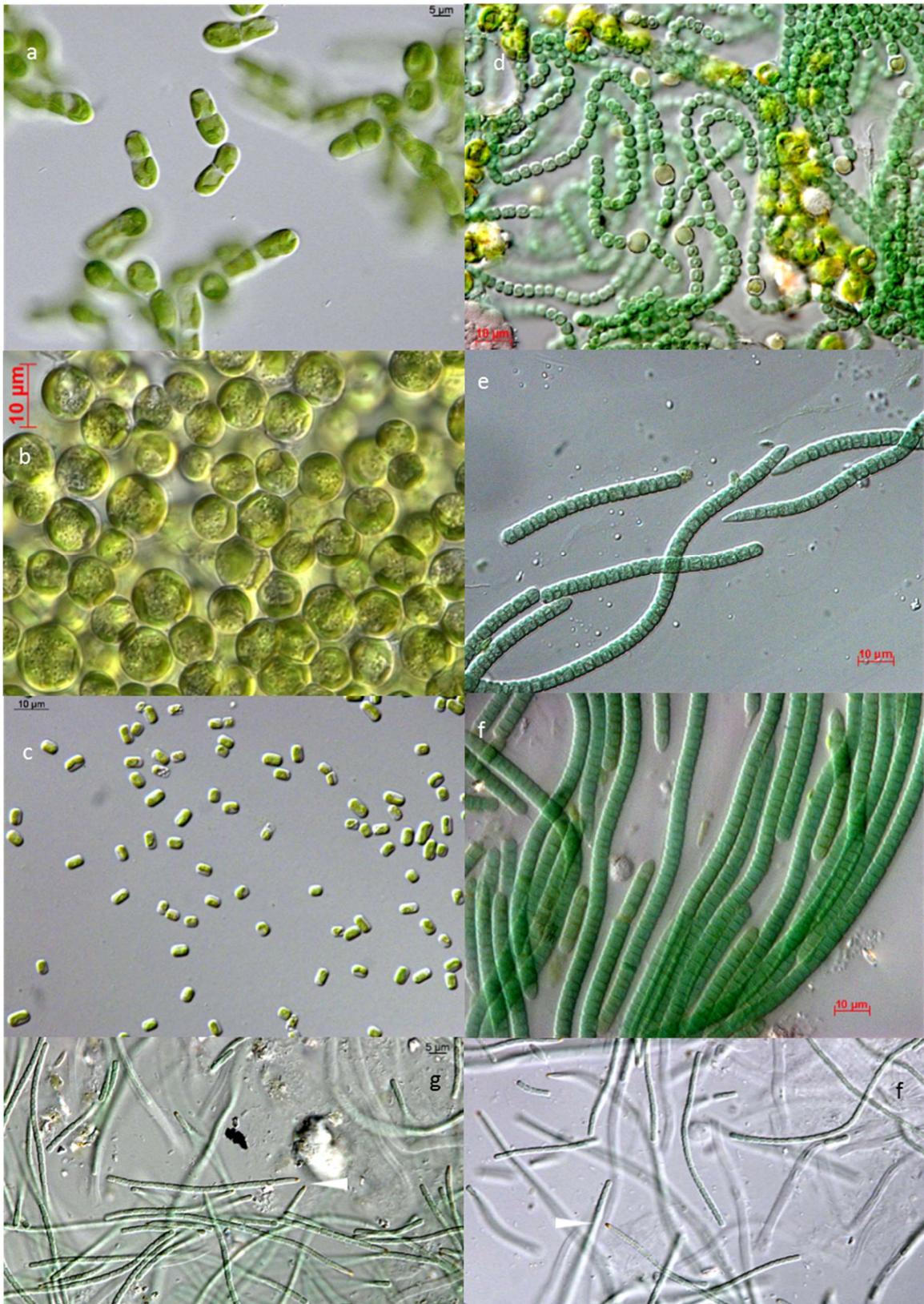


Fig. 2 Diversidad de algas verdes y cianobacterias encontradas en el área de estudio. (a) *Klebsormidium* sp., (b) *Myrmecia* sp., (c) *Stichococcus* sp. (d) *Nostoc microscopicum*, (e) *Microcoleus* sp., (f) *Phormidium* sp., (g) y (h) *Oculatella* sp. con la "mancha ocular" roja (triángulo blanco).

Tabla 3 Líquenes y musgos registrados en las biocostras en el sur del Desierto Chihuahuense

Especies	SN		SC		SS	
	BET	BDV	BET	BDV	BET	BDV
Líquenes						
Collemataceae						
<i>Collema</i> sp. Weber ex F.H. Wigg.	+	+				+
Lichinaceae						
<i>Peccania</i> sp. A. Massal. ex Arnold	+			+		
Peltulaceae						
<i>Peltula obscurans</i> (Nyl.) Gyelnik	+	+				+
<i>Peltula patellata</i> (Nyl.) Gyelnik	+			+		
Psoraceae						
<i>Psora crenata</i> (Taylor) Reinke	+		+			
<i>Psora decipiens</i> (Hedwig) Hoffm.						+
Ramalinaceae						
<i>Toninia lutosa</i> (Ach.) Timdal		+				
Teloschistaceae						
<i>Caloplaca</i> sp. Th. Fr.		+				
<i>Gyalolechia desertorum</i> (Tomin) Søchting, Frödén & Arup	+	+				
Verrucariaceae						
<i>Endocarpon pallidum</i> Ach	+	+	+			
<i>Catapyrenium</i> sp. Flot.		+				
<i>Placidum</i> sp. A. Massal.		+				
<i>Placidium lachneum</i> (Ach.) B. de Lesd.						+
<i>Placidium squamulosum</i> (Ach.) Breuss	+	+	+	+		+
Líquén sp. 1			+			
Riqueza total de especies	8	9	4	3	0	5
Musgos						
Musgo sp1	+	+	+	+		+
Musgo sp2	+	+	+			+
Musgo sp3	+	+				

El análisis Clúster (Figura 4b), muestra las afinidades de agrupamiento por composición de especies de las biocostras en los sitios y los microambientes del Semidesierto Queretano. Se distinguen cuatro grupos, el primero lo conforman los dos microambientes del sitio norte (SN), el segundo abarcó los dos microambientes del sitio centro (SC), el grupo tres solo estuvo formado por el microambiente BET del sitio sur (SS) y, por último, el grupo cuatro se formó con el microambiente BDV del sitio SS.

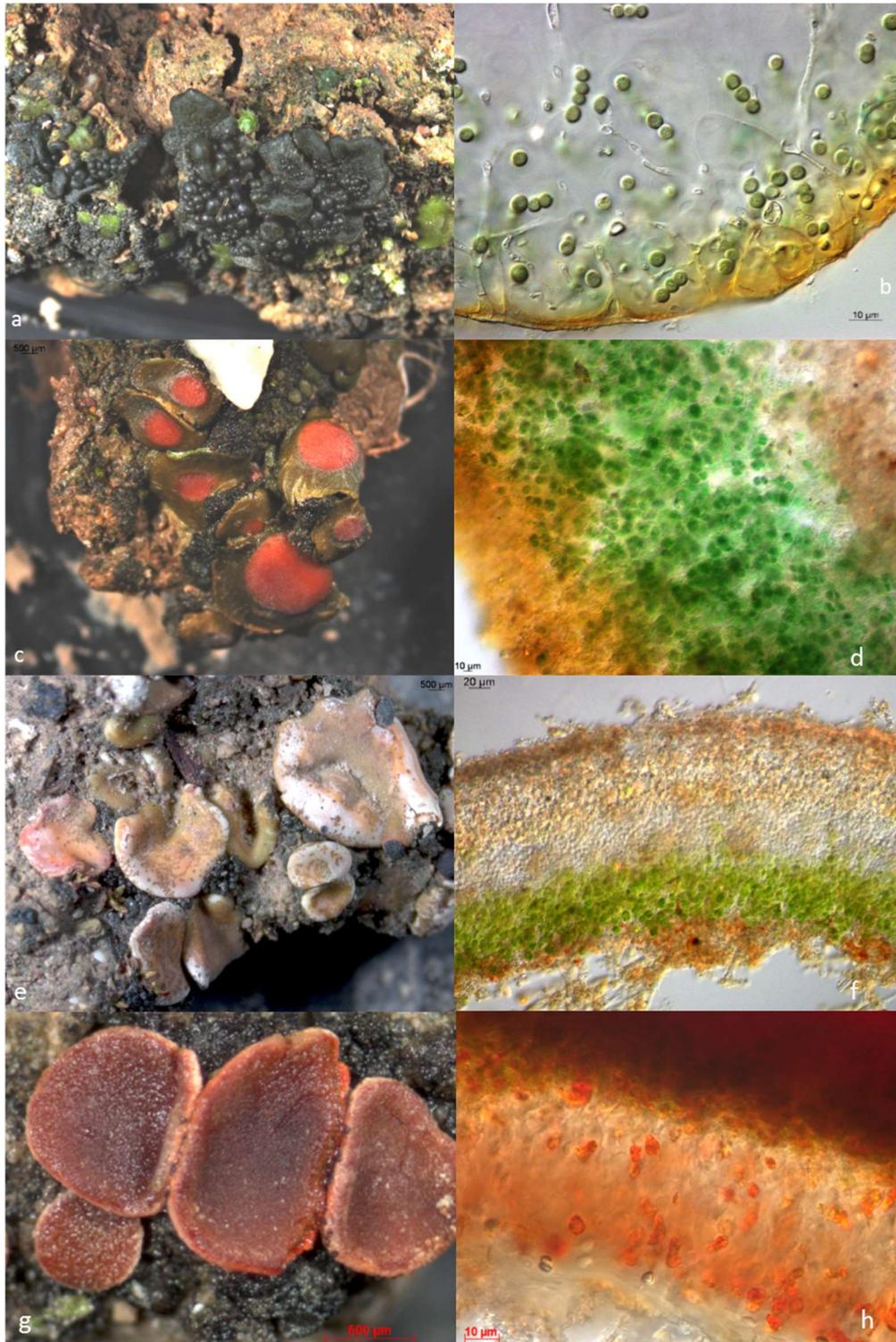


Fig. 3 Diversidad de líquenes presentes en las biocostras del Semidesierto Queretano, (a) *Collema* sp. (b) Corte transversal del talo de *Collema* sp., con *Nostoc* sp. como fotobionte, (c) *Peltulla obscurans* (d) Corte transversal de *Peltulla obscurans*, se observa la capa algal, *Chroococcidiopsis* sp. como fotobionte (e) *Psora decipiens*, (f) Estructura interna de *Psora decipiens*, se observa el córtex superior, la médula, la capa algal y el córtex inferior. (g) líquen rojo (h) Corte transversal, se aprecia a *Trentepohlia* sp. como fotobionte, unico líquen con coloración naranja-rojiza en la estructura interna del talo.

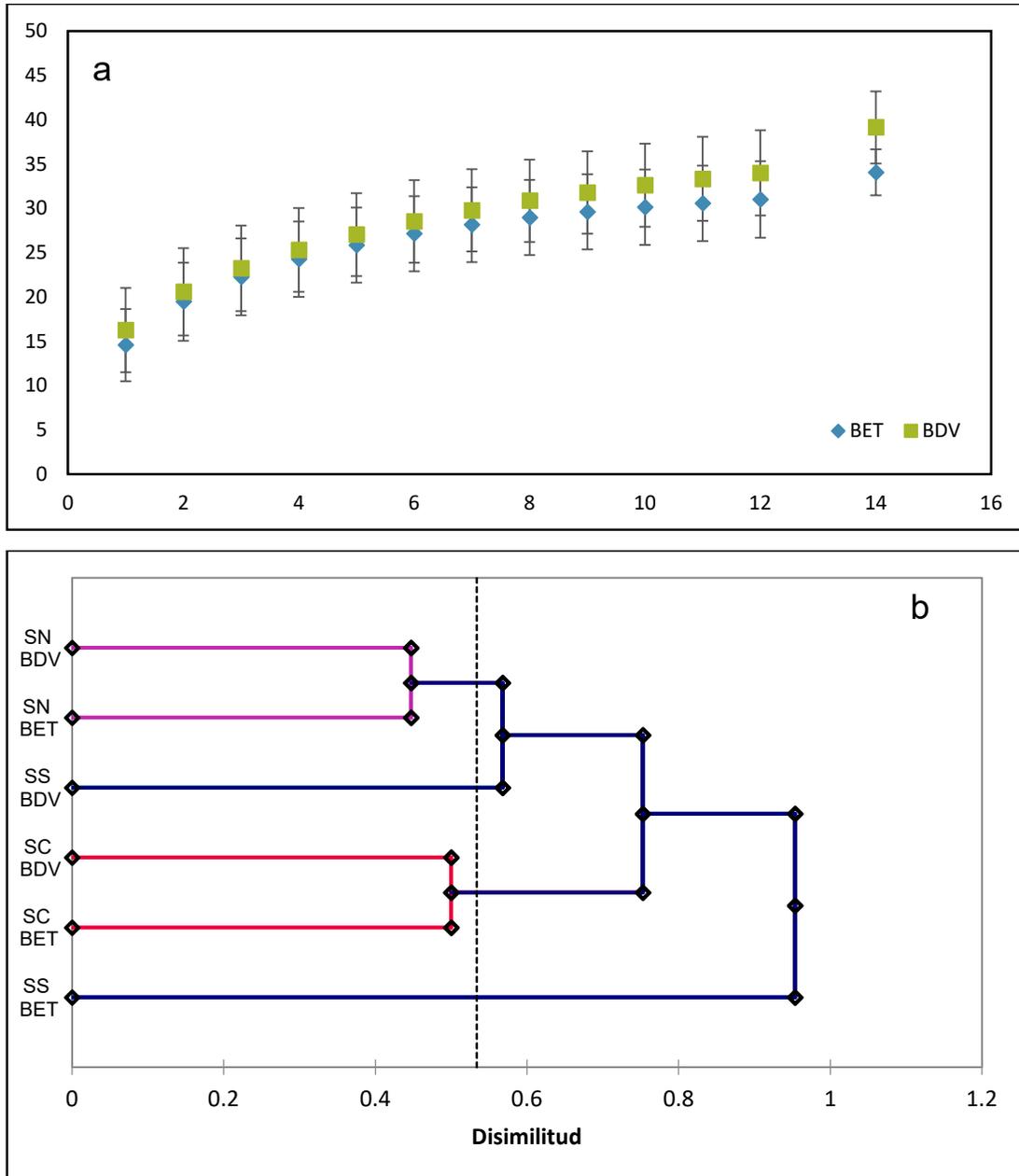


Fig. 4 a) Curvas de rarefacción de la riqueza de especies de las biocostras del Semidesierto Queretano y estimador Chao2 (intervalo de confianza \pm 95%, extrema derecha). Se comparan las especies de los dos microambientes evaluados: Biocostra expuesta totalmente (BET) y Biocostra debajo de vegetación (BDV). Diferencias significativas en la riqueza de especies se suponen si los intervalos de confianza al 95% no se superponen en la asíntota de la curva. b) Análisis Clúster, usando el coeficiente de disimilitud de Sørensen-Dice y el método de aglomeración Ward, indicando la relación entre la composición de especies de los sitios y los dos microambientes evaluados en el Semidesierto Queretano. SN: sitio norte, SC: Sitios Centro, SS: Sitio Sur; BET: Biocostra expuesta totalmente y BDV: Biocostra debajo de vegetación.

La composición de especies de las biocostras en el SN tuvo un 44.7% de disimilitud entre los dos microambientes, en el SC entre microambientes la disimilitud fue del 50% y en el SS donde cada microambiente formó un grupo separado, la BDV tiene menor disimilitud al SN con un 56.8%; finalmente, el microambiente BET es el que presentó la mayor disimilitud con respecto al resto de los sitios con un 95.3%, el cual es significativamente independiente del resto de los sitios y microambientes.

3.2 Biocostras en México

Un total de 40 referencias bibliográficas hacen referencia a biocostras en México, sin embargo, no todas reportan especies o solo se enfocan en algunos grupos funcionales y varias investigaciones realizadas en sitios geográficamente muy cercanos, reportan las mismas especies; por esta razón, para homogeneizar los datos, se concentró la información en 17 sitios correspondientes a cuatro regiones áridas y semiáridas de México, la Península de Baja California, el Desierto Chihuahuense debido a la extensión superficial se dividió en dos, norte y centro, y el valle de Tehuacán-Cuicatlán. En la Península de Baja California se agruparon cinco sitios, en el DC norte cuatro sitios y en el DC centro cinco, por último, en el valle de Tehuacán- Cuicatlán se reportan tres sitios estudiados. El listado completo de especies reportadas en biocostras en México se encuentra en el Anexo 1.

El análisis clúster (Figura 5) muestra la disimilitud entre la composición de las especies de las biocostras en cinco regiones áridas de México, en el que se formaron tres grupos claramente definidos. El primer grupo, y que presenta la menor disimilitud, es el que comprende los tres sitios pertenecientes al Desierto Chihuahuense, siendo el Desierto Chihuahuense centro y el Semidesierto Queretano similares en un 85% en relación a la composición de las especies, y este conglomerado es disimilar al DC N en un 25.7%.

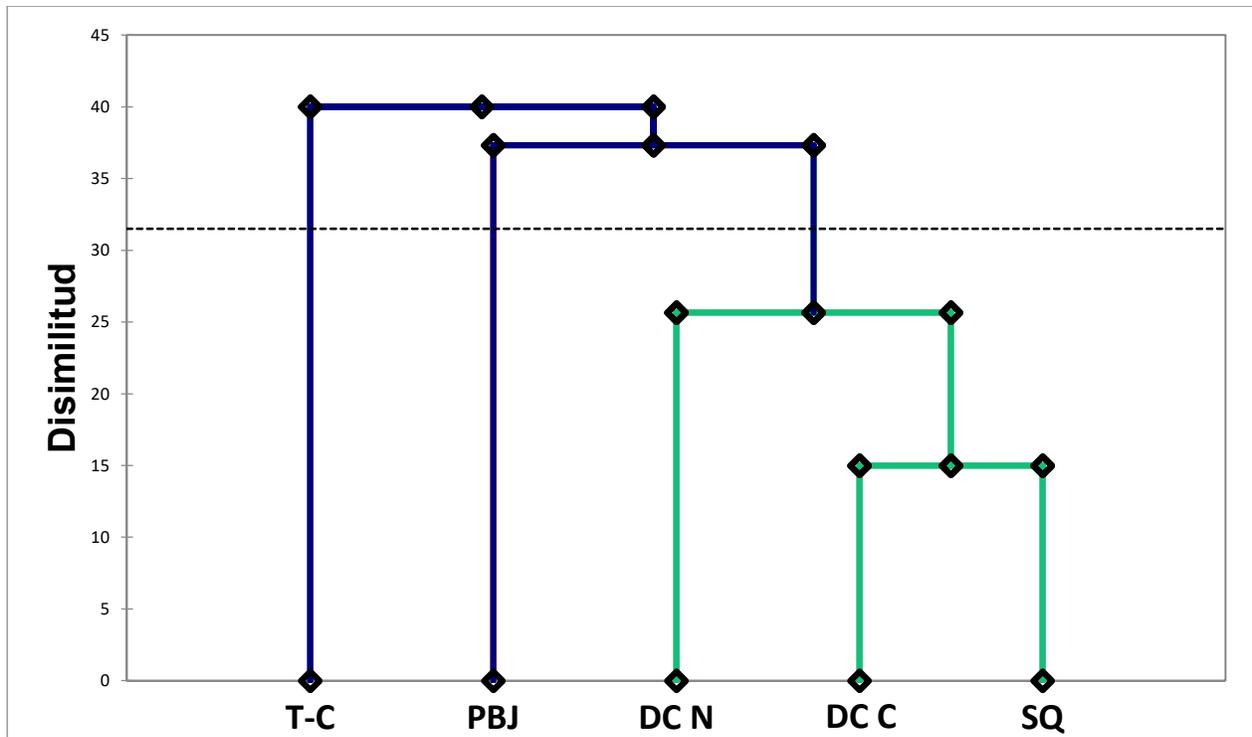


Fig. 5 Análisis clúster por Índice de disimilitud (Método de Ward con distancia euclidiana) que muestra las diferencias en la composición de cianobacterias, líquenes y musgos en cinco regiones áridas de México. T-C Tehuacán-Cuicatlán, PBJ Península de Baja California, DCN Desierto Chihuahuense norte, DCC Desierto Chihuahuense centro y SQ Semidesierto queretano.

La Península de Baja California formó un grupo independiente con una disimilitud del 37.3% en relación al DC y, finalmente, el Valle de Tehuacán-Cuicatlán también tuvo su propio grupo, con una disimilitud del 40% con el resto de regiones áridas en México.

El análisis clúster (Figura 5) muestra la disimilitud entre la composición de las especies de las biocostras en cinco regiones áridas de México, en el que se formaron tres grupos claramente definidos. El primer grupo, y que presenta la menor disimilitud, es el que comprende los tres sitios pertenecientes al Desierto Chihuahuense, siendo el Desierto Chihuahuense centro y el Semidesierto Queretano similares en un 85% en relación a la composición de las especies, y este conglomerado es disimilar al DC N en un 25.7%.

La Península de Baja California formó un grupo independiente con una disimilitud del 37.3% en relación al DC y, finalmente, el Valle de Tehuacán-Cuicatlán también tuvo su propio grupo, con una disimilaridad del 40% con el resto de regiones áridas en México.

4. Discusión

Este es el primer estudio realizado en la región Meridional del Desierto Chihuahuense, así como el primero que abarca a las algas verdes como grupo funcional en las biocostras en México, además de cianobacterias y líquenes. Los resultados obtenidos apoyan la hipótesis que existe una gran diversidad de especies asociadas a las biocostras dependiendo de su ubicación geográfica, así como otros factores como la altitud, clima, topografía y la vegetación, esta diversidad a través del gradiente altitudinal puede incrementar o disminuir (Castillo-Monroy & Benítez, 2015). Por ejemplo, se ha documentado que la riqueza de líquenes y briofitas se incrementa a lo largo de un gradiente altitudinal (Austrheim, 2002; Bruun, et al., 2006).

Las biocostras evaluadas en el trabajo se encontraban en la última etapa sucesional, referida como biocostra de cianobacterias con ciano y chloro líquenes de acuerdo con Büdel *et al.*, (2009), sin embargo, la presencia de briofitas especialmente musgos, también fue registrada, aunque no fue un grupo dominante. Las especies enlistadas en las Tablas 1, 2 y 3, no son representativas del Desierto Chihuahuense, no obstante, es el listado más completo que existen hasta el momento, sobre especies asociadas a biocostras en México y es el primer inventario de la región Meridional del DC, así como del Semidesierto Queretano; al mismo tiempo, se comparan las cuatro grandes regiones áridas que hay México con respecto a la composición de especies de las biocostras. Rivera et al., (2006) compara las especies reportadas en el valle de Tehuacán-Cuicatlán (TC) con las de otros desiertos de Norteamérica, y a pesar de que registra algunas especies cosmopolitas comunes en las biocostras del mundo, la composición de especies del TC es diferente a otras regiones áridas, incluso difiere de las regiones áridas de México, como se puede observar en la Figura 5, no obstante, hay varios puntos a considerar; en el estudio de Rivera et al., (2006), se reportan 19 especies de musgos, siendo el grupo funcional dominante reportado para el TC; ningún otro estudio en México referente a Costras Biológicas del Suelo ha reportado tantas especies de musgos como los trabajos realizados en el valle de Tehuacán-Cuicatlán (Rivera-Aguilar et al., 2009; Sandoval-Pérez *et al.*, 2016); por otra parte, la aridez del TC es originada por el efecto de sombra orográfica de la sierra Zongolica que forma parte de la sierra Madre del Sur

(Miguel-Talonia, Téllez-Valdés & Murguía-Romero, 2014) y la vegetación principal en las áreas estudiadas es matorral xerófilo dominada por cactáceas columnares; considerando estos factores, el TC difiere geográfica y ambientalmente del resto de las zonas áridas de México y, claramente se observa en la Figura 5.

En lo referente al Desierto Chihuahuense, la principal característica, es la presencia de la gobernadora (*Larrea tridentata*) asociada a diferentes tipos de vegetación; por ejemplo, en el norte del DC, Molina-Guerra et al., (2014) reportan la composición y cobertura de las biocostras asociadas a pastizal gipsófilo, registrando un total de seis especies de líquenes y una cianobacteria; en referencia a los líquenes, reportan a *Endocarpon* sp. *Placidium* sp. y *Psora* sp., mismos géneros encontrados en el Semidesierto Queretano; a diferencia de otras áreas de pastizal al centro del DC, donde los suelos contienen carbonatos de calcio, pero sin yeso, las especies no coinciden ni con las reportadas al norte del DC, ni con las del Semidesierto Queretano, como *Acarospora schleicheri*, *Buellia* sp., y *Placynthiella uliginosa* (Jiménez-Aguilar 2005). Sin embargo, Concostrina-Zubiri et al., (2014); amplían el panorama sobre biocostras en la región centro del DC, reportando 19 especies de líquenes, siendo el género *Acarospora* el más diverso con seis especies, además de incrementar el listado conocido con especies como *Endocarpon pussilum*, *Peltula michoacanensis* y *Psora ictérica*.

En México, la familia Verrucariaceae es una de las que presenta mayor diversidad de especies (96), familia a la que pertenece *Placidium squamulosum*, liquen con una amplia distribución en México; desde la Península de Baja California (Büdel, et al., 2013) hasta el Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Rivera-Aguilar et al., 2006) siendo una de las especies de liquen más común en las biocostras de México (Molina-Guerra, et al., 2014, Mendoza-Aguilar, 2014).

Los resultados muestran claramente que la riqueza de especies responde al gradiente altitudinal, siendo el sitio sur (SS) el que contó con los valores tanto de riqueza como de diversidad; este sitio es el que cuenta con la mayor altitud (1900 msnm), cabe señalar que este sitio se encuentra cerca de la carretera que comunica con la presa de Zimapán y a lo largo de la carretera hay tres comunidades (Cerro Prieto, Puerto del Salitre y Mesa de León), lo que refiere la presencia de ganado en la zona, por lo que este

factor de igual manera debe ser atribuible a la baja riqueza de especies presente en las biocostras de la zona; Concostrina-Zubiri *et al.*, (2014) refieren que a mayor pastoreo menor es la cobertura de líquenes y briofitas en las biocostras, mismo efecto que otros estudios han podido corroborar (Bertiller & Area, 2011; Gómez *et al.*, 2012, Concostrina-Zubiri *et al.*, 2016.). Actualmente, se conoce que el pastoreo intensivo asociado al incremento de aridez en los ecosistemas, provocará una reducción en la diversidad funcional de las biocostras, así como una disminución en las capacidades atribuibles a ellas, ocasionando la pérdida progresiva del funcionamiento de los ecosistemas (Mallen-Cooper, Eldridge, & Delgado-Baquerizo, 2017). Por lo que planes de manejo responsables y programas de restauración son necesarios implementar, para detener la pérdida de diversidad asociada a las biocostras, así como todos los beneficios ecosistémicos que proporcionan. Sin embargo, también se debe de conocer si la altitud es la que está limitando la distribución de las especies o en su defecto, si es la perturbación por ganado.

Respecto a las cianobacterias, tanto *Scytonema sp.* como *Nostoc sp.*, son las especies más frecuentes en biocostras tanto en el DC como a nivel mundial, (Belnap y Lange, 2003). El género *Scytonema sp.* ha sido reportada en la península de Baja California (Maya *et al.*, 2002), en el norte del DC (Mendoza-Aguilar, 2014) y en el TC (Rivera-Aguilar, *et al.*, 2006), y a pesar del gradiente altitudinal y la perturbación del SS se registró en los tres sitios evaluados en el Semidesierto Queretano.

Nostoc sp. y *Scytonema sp.* se establecen bajo condiciones extremas de temperatura, desecación e intensidad de luz solar, esto último debido a que presentan mayor cantidad de pigmentos fotosintéticos que otras especies como *Microcoleus* (Péli *et al.* 2011), además de presentar heterosistos, lo que las hace capaces de fijar nitrógeno atmosférico en el suelo, dejándolo disponible para las plantas vasculares (Kumar *et al.* 2009; Maya *et al.* 2002).

Recientemente, el género *Oculatella sp.* fue descrito y su distribución se limita al desierto de Mojave y del Colorado, y en una cascada en Utah en los Estados Unidos de América, en suelos volcánicos de Grecia, en una cueva en Hawái y en el Desierto de Atacama (Osorio-Santos *et al.*, 2014), dos especies nuevas han sido reportadas en Ucrania

(Vinogradova et al., 2017) y una más en el ártico (Jung *et al.*, 2018). Este género es muy distintivo de otras especies dentro del orden Pseudanabaenales ya que presenta, una “mancha ocular” o estigma en la punta de la célula apical madura (Albertano *et al.*, 2000) de color rojizo (Figura 2g,h), compuesta principalmente por rodopsina. Por primera vez, se registra para el Desierto Chihuahuense y en particular para México; no obstante, su distribución estuvo limitada al SC que presenta una altitud de 1600 msnm, estudios más profundos sobre la taxonomía y aplicación de métodos moleculares, permitirán concluir, de cual especie en particular se trata o en su defecto, si es un nuevo registro para el género.

5. Conclusiones

Conocer que especies están presentes en las biocostras de una región permitirá saber el potencial de servicios ecosistémicos en los que participan y entender el funcionamiento de los ecosistemas. Este trabajo es un primer acercamiento al estudio de las biocostras en el sur del DC, y es meramente exploratorio. Actualmente se está trabajando con las variables edáficas y ambientales para conocer los factores que influyen en la estructura y distribución de las especies que conforman las biocostras en el Semidesierto Queretano.

6. Referencias

- Abd El-Ghani, M. M., Huerta-Martínez, F. M., Hongyan, L., & Qureshi, R. (2017). Plant responses to hyperarid desert environments. *Plant Responses to Hyperarid Desert Environments*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59135-3>.
- Albertano, P., Barsanti, L., Passarelli, V. & Gualtieri, P. (2000). A complex photoreceptive structure in the cyanobacterium *Leptolyngbya* sp. *Micron*, 31: 27–34.
- Austrheim, G 2002 G. Plant diversity patterns in semi-natural grasslands along an elevational gradient in southern Norway. *Plant Ecology*, 161 (2002), pp. 193-205
- Barger, N. N., Weber, B., Garcia-Pichel, F., Zaady, E., & Belnap, J. (2016). Patterns and Controls on Nitrogen Cycling of Biological Soil Crusts (pp. 257–285). https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_14
- Belnap, J. (2006). The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes*, 20(15), 3159–3178. <https://doi.org/10.1002/hyp.6325>
- Belnap, J., & Büdel, B. (2016). Biological Soil Crusts as Soil Stabilizers. En *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands* (pp. 305–320). https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_16
- Belnap, J., & Gillette, D. A. (1998). Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance. *Journal of Arid Environments*, 39(2), 133–142. <https://doi.org/10.1006/jare.1998.0388>
- Belnap, J., Kaltenecker, J. H., Rosentreter, R., Williams, J., Leonard, S., & D.J., E. (2001). *Biological soil crusts: Ecology and management: (TR–1730-2)*. Denver, CO.: US Department of the Interior.
- Belnap, J., & Lange, O. L. (2003). *Biological Soil Crusts: Structure, Function and Management*. (I. T. Baldwin, M. M. Caldwell, G. Heldmaier, O. L. Lange, H. A. Mooney, E.-D. Schulze, & U. Sommer, Eds.) (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56680-6>
- Belnap, J., Weber, B., & Büdel, B. (2016). Biological Soil Crusts as an Organizing Principle in Drylands. En B. Weber, B. Büdel, & J. Belnap (Eds.), *Biological Soil Crusts: an Organizing Principle in Drylands* (pp. 3–13). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_1
- Bertiller MB, Ares JO (2011) Does sheep selectivity along grazing paths negatively affect biological crusts and soil seed banks in arid shrublands? A case study in the Patagonian Monte, Argentina. *J Environ Manage* 92:2091–2096. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.03.027>
- Beymer, R. J., & Klopatek, J. M. (1991). Potential contribution of carbon by microphytic crusts in pinyon-juniper woodlands. *Arid Land Research and Management*, 5(3), 187–198. <https://doi.org/10.1080/15324989109381279>
- Beyschlag, W., Wittland, M., Jentsch, A., & Steinlein, T. (2008). Soil crusts and disturbance benefit plant germination, establishment and growth on nutrient deficient sand. *Basic and Applied Ecology*, 9(3), 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2007.03.002>
- Bowker, M. A., Mau, R. L., Maestre, F. T., Escolar, C., & Castillo-Monroy, A. P. (2011). Functional profiles reveal unique ecological roles of various biological soil crust organisms. *Functional Ecology*, 25(4), 787–795. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01835.x>
- Brodo, I. M., Sharnoff, I. M. B. S. D. S. S., Sharnoff, S. D., Sharnoff, S., of Nature, C. M., Laurie-Bourque, S., & Raven, P. (2001). *Lichens of North America*. Yale University Press.
- Bruun HH, Moen J, Virtanen R, Grytnes J-A, Oksanen L, Angerbjörn A. (2006) Effects of altitude and topography on species richness of vascular plants, bryophytes and lichens in alpine communities. *J Veg Sci* 17:37–46.

- Büdel, B., Darienko, T., Deutschewitz, K., Dojani, S., Friedl, T., Mohr, K. I., ... Weber, B. (2009a). Southern African Biological Soil Crusts are Ubiquitous and Highly Diverse in Drylands, Being Restricted by Rainfall Frequency. *Microbial Ecology*, 57(2), 229–247. <https://doi.org/10.1007/s00248-008-9449-9>
- Büdel, B., Dulić, T., Darienko, T., Rybalka, N., & Friedl, T. (2016). Cyanobacteria and Algae of Biological Soil Crusts (pp. 55–80). https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_4
- Büdel, B., Vivas, M., & Lange, O. L. (2013). Lichen species dominance and the resulting photosynthetic behavior of Sonoran Desert soil crust types (Baja California, Mexico). *Ecological Processes*, 2(1), 6. <https://doi.org/10.1186/2192-1709-2-6>
- Castillo-Monroy, A. P., & Benítez, Á. (2015). Abundance patterns and components richness of biological soil crust in a dry shrubland in southern Ecuador. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 7(1), B88–B97.
- Chamizo, S., Belnap, J., Eldridge, D. J., Cantón, Y., & Malam Issa, O. (2016). The Role of Biocrusts in Arid Land Hydrology (pp. 321–346). https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_17
- Colwell, R. K. 2013. EstimateS, Version 9.1: Statistical Estimation of Species Richness and Shared Species from Samples (Software and User's Guide).
- Colwell, R.K. and Coddington, J.A. (1994) Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Philosophical Transactions: Biological Sciences* 345, 101–118.
- Concostrina-Zubiri, L., Huber-Sannwald, E., Martínez, I., Flores Flores, J. L., & Escudero, A. (2013). Biological soil crusts greatly contribute to small-scale soil heterogeneity along a grazing gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 64, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.03.029>
- Concostrina-Zubiri, L., Huber-Sannwald, E., Martínez, I., Flores Flores, J. L., Reyes-Agüero, J. A., Escudero, A., ... Belnap, J. (2014). Biological soil crusts across disturbance–recovery scenarios: effect of grazing regime on community dynamics. *Ecological Applications*, 24(247), 1863–1877.
- Concostrina-Zubiri, L., Martínez, I., Huber-Sannwald, E., & Escudero, A. (2013). Biological Soil Crust effects and responses in arid ecosystems: recent advances at the species level. *Ecosistemas*, 22(3), 95–100. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.13>
- Degenhardt, W. G., Painter, C. W., & Price, A. H. (1996). *Amphibians and reptiles of New Mexico*. Albuquerque, New Mexico: University of New Mexico Press.
- Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F. T., Gallardo, A., & Maestre, F. T. (2013). Biological soil crusts increase the resistance of soil nitrogen dynamics to changes in temperatures in a semi-arid ecosystem. *Source: Plant and Soil*, 366(12), 35–47.
- Dinerstein, E., Olson, D., Atchley, J., Loucks, C., Contreras-Balderas, S., Abell, R., ... Castilleja, G. (2001). *Ecoregion-Based Conservation in the Chihuahuan Desert A Biological Assessment*. World Wildlife Fund, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), The Nature Conservancy, PRONATURA Noreste, and the Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM).
- Eldridge, D. J., & Rosentreter, R. (1999). Morphological groups: a framework for monitoring microphytic crusts in arid landscapes. *Journal of Arid Environments*.
- Flechtner, V. R., Johansen, J. R., & Clark, W. H. (1998). Algal composition of microbiotic crusts from the Central Desert of Baja California, Mexico. *Western North American Naturalist*, 58(October 2015), 295–311. <https://doi.org/10.2307/41713069>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climático de Köppen*. (Instituto de Geografía, Ed.) (Quinta). Distrito Federal: UNAM.

- Godínez-Alvarez, H., Morín, C., & Rivera-Aguilar, V. (2011). Germination, survival and growth of three vascular plants on biological soil crusts from a Mexican tropical desert. *Plant Biology*, 14(1), no-no. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2011.00495.x>
- Gómez, D. A., Aranibar, J. N., Tabeni, S., Villagra, P. E., Garibotti, I. A., Atencio, A., ... General San Martín, P. (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. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2011.09.001>
- Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M. A., & López-Ríos, G. F. (2012). *Ecología de los desiertos del mundo*. (J. E. Ibarra, Ed.) (1a ed.). Chapingo: Universidad Autónoma Chapingo.
- Granados-Sánchez, D., Sánchez-González, A., Granados-Victorino, R. L., & Borja-de la Rosa, A. (2011). Ecología de la vegetación del desierto chihuahuense. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XVII(Especial), 111–130. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.10.102>
- Hernandez-Oria, J. G., Chavéz-Martínez, R., & Sánchez-Martínez, E. (2007). Factores de riesgo en las Cactaceae amenazadas de una región semiárida en el sur del Desierto Chihuahuense, México. *INTERCIENCIA*, 32(11), 728–734.
- Hernández, H. M., & Gómez-Hinostrosa, C. (2005). Cactus diversity and endemism in the Chihuahuan Desert Region. En *Biodiversity, Ecosystems, and Conservation in Northern Mexico* (pp. 264–275).
- Hernández, H. M., Gómez-Hinostrosa, C., & Goettsch, B. (2004). Checklist of the Chihuahuan Desert Cactaceae. *Harvard Papers Bot*, 9, 51–68.
- Hoyt, C. A. (2002). The Chihuahuan Desert: Diversity at Risk. *Endangered species bulletin*, 27(2), 16–17.
- Huerta-Martínez, F. M., Muñoz-Urias, A., Neri-Luna, C., & Uribe-Mú, C. A. (2010). Biodiversidad y funcionamiento de ecosistemas de zonas semiáridas de México. *Rev Conocimiento+Cultura+Ciencia Universidad de Guadalajara*, 2(4), 27–38.
- Jiménez-Aguilar, A. (2005). Caracterización funcional de costras biológicas de suelo en un pastizal semiárido de San Luis Potosí. Tesis de maestría. IPICYT A.C.
- Jimenez-Aguilar, A., Huber-Sannwald, E., Belnap, J., Smart, D. R., & Moreno-Arredondo, J. T. (2009). Biological soil crusts exhibit a dynamic response to seasonal rain and release from grazing with implications for soil stability. *Journal of Arid Environments*, 73, 1158–1169. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.05.009>
- Jung, P., Briegel-Williams, L., Schermer, M., & Büdel, B. (2018). Strong in combination: Polyphasic approach enhances arguments for cold-assigned cyanobacterial endemism. *MicrobiologyOpen*, e00729. <https://doi.org/10.1002/mbo3.729>
- Komárek, J. (2013). *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, Bd. 19/3: Cyanoprokaryota. *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, (1a ed.). Heidelberg: Springer Spektrum
- Komárek, J., & Anagnostidis, K. (1998). Cyanoprokaryota 1. Chroococcales. En H. Ettl, G. Gärtner, H. Heynig, & D. Mollenhauer (Eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa* 19/1 (p. 548). Jena-Stuttgart-Lübeck-Ulm: Gustav Fischer.
- Komárek, J., & Anagnostidis, K. (2005). Cyanoprokaryota. 2. Oscillatoriales. En B. Büdel, L. Krienitz, G. Gärtner, & M. Schagerl (Eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa* 19/2 (p. 759). Heidelberg: Elsevier/Spektrum.
- Kumar K, Mella-Herrera R, & Golden J (2009) Cyanobacterial Heterocysts. *Cold Spring Harb Perspect Biol*:2: a000315 <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a000315>
- Li, B., Gao, J., Wang, X., Ma, L., Cui, Q., & Vest, M. (2016). Effects of biological soil crusts on water infiltration and evaporation Yanchi Ningxia, Maowusu Desert, China. *International Journal of Sediment Research*, 31, 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.05.005>

- López-Cortés, A., Maya, Y., & García-Maldonado, J. Q. (2010). Diversidad filogenética de especies de *Microcoleus* de costras biológicas de suelo de la península de Baja California, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 81(1), 1–7.
- Maestre, F. T., Eldridge, D. J., Soliveres, S., Kéfi, S., Delgado-Baquerizo, M., Bowker, M. A., ... Berdugo, M. (2016). Structure and Functioning of Dryland Ecosystems in a Changing World. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 47(1), 215–237. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-121415-032311>
- Maestre, F. T., Escolar, C., de Guevara, M. L., Quero, J. L., Lázaro, R., Delgado-Baquerizo, M., ... Gallardo, A. (2013). Changes in biocrust cover drive carbon cycle responses to climate change in drylands. *Global change biology*, 19(12), 3835–3847. <https://doi.org/10.1111/gcb.12306>
- Magurran, A. E. (2004). *Ecology Diversity and its Measurement*. Journal Of The Royal Statistical Society Series A General (Vol. 136). Princeton University Press.
- Mallen-Cooper, M., Eldridge, D. J., & Delgado-Baquerizo, M. (2017). Livestock grazing and aridity reduce the functional diversity of biocrusts. *Plant and Soil*, 429(1–2), 175–185. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3388-5>
- Maya, Y., López-Cortés, A., & Soeldner, A. (2002). Cyanobacterial microbiotic crusts in eroded soils of a tropical dry forest in the Baja California Peninsula, Mexico. *Geomicrobiology Journal*, 19(5), 505–518. <https://doi.org/10.1080/01490450290098469>
- McCune, B., & Rosentreter, R. (2007). *Biotic Soil Crust Lichens of the Columbia Basin*. Northwest Lichenologists.
- Mendoza-Aguilar, D. O., Cortina, J., & Pando-Moreno, M. (2014). Biological soil crust influence on germination and rooting of two key species in a *Stipa tenacissima* steppe. *Plant and Soil*, 375(1–2), 267–274. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1958-8>
- Mendoza, D. (2014). *Costras biológicas del suelo en ecosistemas semiáridos: composición, rendimiento fisiológico y efecto en la germinación de plantas*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Miguel-Talonia, C., Téllez-Valdés, O. Murguía-Romero, M. (2014) Las cactáceas del valle de Tehuacán-Cuicatlán, México: estimación de la calidad del muestreo. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85: 436-444.
- Molina-Guerra, V. M., Pando-Moreno, M., Jurado, E., Cantú-Silva, I., & Alanís-Rodríguez, E. (2013). Costras biológicas del suelo en pastizales gipsófilos del noreste de México. *CIENCIA UANL*, 63, 89–97.
- Molina, V., Pando, M., Marmolejo, J., & Alanís, E. (2014). Diversidad de costras biológicas del suelo en pastizales halófilos del norte de México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 1(17), 9.
- Nash III, T. H., Ryan, B. D., Gries, C., & Bungartz, F. (2002). *Lichen Flora of the Greater Sonoran Desert Region*. (Thomas H. Nash, Ed.) (illustrate). Lichens Unlimited, Arizona State University.
- Nash, T. H. I., Ryan, B. D., Diederich, P., Gries, C., & Bungartz, F. (2004). *Lichen flora of the greater Sonoran Desert region, vol.2*. Lichens Unlimited, Arizona State University.
- Osorio-Santos, K., Pietrasiak, N., Bohunická, M., Miscoe, L. H., Kováčik, L., Martin, M. P., & Johansen, J. R. (2014). Seven new species of *Oculatella* (Pseudanabaenales, Cyanobacteria): taxonomically recognizing cryptic diversification. *European Journal of Phycology*, 49(4), 450–470. <https://doi.org/10.1080/09670262.2014.976843>
- Pando-Moreno, M., Molina, V. Í., Jurado, E., & Flores, J. (2014a). Effect of Biological Soil Crusts on the seed Germination of Three Plant Species Under Laboratory Conditions. *Botanical Sciences*, 92(2), 273–279.

- Péli E, Lei T, Laufer Z, Porembski S, Tuba Z (2011) Ecophysiological responses of desiccation-tolerant cryptobiotic crusts. *Cent Eur J Biol* 6:838-849 doi:10.2478/s11535-011-0075-z.
- Quiñones-Vera, A., José, J., Manuel, C., José, J., Abel, C., Mexicana de la Ciencia del Suelo, S., & Chapingo, A. (2009). Efecto de la costra biológica sobre la infiltración de agua en un pastizal. *Terra Latinoamericana*, 27(4), 287–293. https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792009000400002&lng=es&tlng=es.
- Rivera-Aguilar, V., Godínez-Alvarez, H., Manuell-Cacheux, I., & 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(1), 344–352. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.012>
- Rivera-Aguilar, V., Godínez-Alvarez, H., Moreno-Torres, R., & Rodríguez-Zaragoza, S. (2009). Soil physico-chemical properties affecting the distribution of biological soil crusts along an environmental transect at Zapotitlán drylands, Mexico. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.05.003>
- Rivera-Aguilar, V., Montejano, G., Rodríguez-Zaragoza, S., & Durán-Díaz, A. (2006). Distribution and composition of cyanobacteria, mosses and lichens of the biological soil crusts of the Tehuacán Valley, Puebla, México. *Journal of Arid Environments*, 67(2), 208–225. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.013>
- Rosentreter, R., Bowker, M., & Belnap, J. (2007). *A Field Guide to Biological Soil Crusts of Western U.S. Drylands - Common Lichens and Bryophytes*. U.S. Government Printing Office, Denver, Colorado, 104.
- Rzedowski, J. (1965). Relaciones geográficas y posibles orígenes de la flora de México. *Bol. Soc. Bot. Mex.*, 29:121–177.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México (1 Edición)*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Rzedowski, J., Calderón De Rzedowski, G., & Zamudio, S. (2012). La flora vascular endémica del estado de Querétaro. I. Análisis numéricos preliminares y definición de áreas de concentración de las especies de distribución restringida. *Acta Botánica Mexicana*, 99, 91–104.
- Sandoval Pérez, A. L., Camargo-Ricalde, S. L., Montañó, N. M., García-Oliva, F., Alarcón, A., Montañó-Arias, S. A., & Esperón-Rodríguez, M. (2016). Biocrusts, inside and outside resource islands of *Mimosa luisana* (Leguminosae), improve soil carbon and nitrogen dynamics in a tropical semiarid ecosystem. *European Journal of Soil Biology*, 74: 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.03.006>
- Strauss, S. L., Day, T. A., Garcia-Pichel, F., & Strauss, S. L. (2012). Nitrogen cycling in desert biological soil crusts across biogeographic regions in the Southwestern United States. *Biogeochemistry*, 108(108). <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9810-1>
- Veste, M. (2005). The importance of biological soil crusts for rehabilitation of degraded arid and semi-arid ecosystems. *Science of Soil and Water Conservation*, 3, 42–47.
- Veste, M., Breckle, S.-W., Eggert, K., & Littmann, T. (2011). Vegetation pattern in arid sand dunes controlled by biological soil crusts along a climatic gradient in the Northern Negev desert. *Basic and Applied Dryland Research*, 5(1), 1–16. <https://doi.org/10.1127/badr/5/2011/1>
- Zamudio, S., Rzedowski, J., Carranza, E., & Calderón De Rzedowski, G. (1992). *La vegetación del estado de Querétaro*. Querétaro, México: CONCYTEQ.

Anexo 1. Composición taxonómica de las biocostras de los desiertos mexicanos.

	Península de Baja California					DC región centro					DC región norte				Valle de Tehuacán			Semidesierto Queretano		
	BC 1	BC 2	BC 3	BC 4	BC 5	J1	J2	SL P1	SL P2	SL P3	NL 1	NL 2	NL 3	NL 4	P1	P2	P3	QN	QC	QS
Cianobacterias																				
Chroococcales																				
<i>Chroococcus turgidus</i> (Kützing) Nägeli																				+
<i>Gloeocapsa</i> sp. Kützing															+	+				
<i>Gloeocapsa atrata</i> Kützing					+															
<i>Gloeocapsa kuetzingiana</i> Nägeli ex Kützing					+															
<i>Gloeocapsa punctata</i> Nägeli					+															
Chroococciopsidales																				
<i>Chroococciopsis</i> sp. Geitler					+									+	+			+	+	
Nostocales																				
<i>Anabaena</i> sp. Bory ex Bornet & Flahault	+																	+		
<i>Calothrix</i> sp. C.Agardh ex Bornet & Flahault									+											
<i>Calothrix elenkinii</i> Kossinskaja			+																	
<i>Calothrix marchica</i> Lemmermann			+																	
<i>Nostoc</i> sp. Nostoc Vaucher ex Bornet & Flahault					+									+	+					
<i>Nostoc commune</i> Vaucher ex Bornet & Flahault	+										+		+							
<i>Nostoc edaphicum</i> Kondrateva																		+	+	
<i>Nostoc microscopicum</i> Carmichael ex Bornet & Flahault			+		+													+		+
<i>Nostoc muscorum</i> C.Agardh ex Bornet & Flahault	+																			
<i>Nostoc piscinale</i> Kützing ex Bornet & Flahault	+																			
<i>Nostoc punctiforme</i> Hariot	+																		+	
<i>Scytonema</i> sp. C.Agardh ex É.Bornet & C.Flahault	+	+		+									+	+				+	+	+
<i>Scytonema hyalinum</i> N.L.Gardner																			+	
<i>Scytonema javanicum</i> Bornet ex Bornet & Flahault															+	+	+			

<i>Scytonema ocellatum</i> Lyngbye ex Bornet & Flahault	+	+		+	+								
<i>Scytonema stuposum</i> Bornet ex Bornet & Flahault					+								
<i>Stigonema hormoides</i> Bornet & Flahault											+		
Oscillatoriales													
<i>Borzia trilocularis</i> Cohn ex Gomont													+
<i>Lyngbya diguetii</i> Gomont	+												
<i>Lyngbya putealis</i> Montagne ex Gomont	+												
<i>Microcoleus chthonoplastes</i> Thuret ex Gomont					+	+							+
<i>Microcoleus</i> sp. Desmazières ex Gomont									+				+
<i>Microcoleus paludosus</i> Gomont			+	+	+					+	+		
<i>Microcoleus sociatus</i> West & G.S.West			+	+	+								
<i>Microcoleus steenstrupii</i> J.B.Petersen	+				+								
<i>Microcoleus subtorulosus</i> Gomont ex Gomont													+
<i>Microcoleus vaginatus</i> Gomont ex Gomont	+			+	+								
<i>Oscillatoria</i> sp. Vaucher ex Gomont													+
<i>Oscillatoria agardhii</i> Gomont													+
<i>Phormidium</i> sp. Kützing ex Gomont			+										+
<i>Phormidium californicum</i> Drouet													+
<i>Phormidium inundatum</i> Kützing ex Gomont						+	+						
<i>Plectonema</i> sp. Thuret ex Gomont	+												
<i>Plectonema tomasinianum</i> var. Gracile Hansg	+												
<i>Pseudophormidium</i> sp. (Forti) Anagnostidis & Komárek													+
													+
													+
Pleurocapsales													
<i>Myxosarcina</i> sp. H.Printz	+												
<i>Myxosarcina burmensis</i> Skuja	+												
<i>Myxosarcina specdtabilis</i> Geitler	+												
Synechococcales													
<i>Aphanocapsa</i> sp. C.Nägeli										+	+		
<i>Leptolyngbya</i> sp. Anagnostidis & Komárek													+
													+

<i>Lecidella</i> sp. Körb.		+	+		+														
<i>Lecidea</i> sp. Ach.																			+
Lichinaceae Nyl.																			
<i>Heppia</i> sp. Nägeli ex A. Massal.		+																	
<i>Heppia adglutinata</i> (Krempelh.) A. Massal.		+																	
<i>Heppia despreauxii</i> (Mont.) Tuck.		+																	
<i>Lempholemma</i> sp. Körb.																			+
<i>Lichinella</i> sp. Nyl.																			+
<i>Peccania</i> sp. A. Massal. ex Arnold																			+
Parmeliaceae Eschw.																			
<i>Xanthoparmelia chlorochroa</i> (Tuck.) Hale																			+
<i>Xanthoparmelia norchlorochroa</i> Hale																			+
<i>Xanthoparmelia terrestris</i> (Kurok. & Filson) Elix & J. Johnst.																			+
Peltulaceae Büdel																			
<i>Peltula euploca</i> (Ach.) Poelt ex Ozenda & Clauzade																			+
<i>Peltula michoacanensis</i> (de Lesd.) Wetmore																			+
<i>Peltula obscurans</i> (Nyl.) Gyeln.																			+
<i>Peltula patellata</i> (Bagl.) Swinscow & Krog		+																	+
<i>Peltula richardsii</i> (Herre) Wetmore		+																	+
Physciaceae Zahlbr.																			
<i>Buellia</i> sp. De Not.																			+
<i>Heterodermia tropica</i> (Kurok.)																			+
Psoraceae Zahlbr.																			
<i>Psora cerebriformis</i> W.A. Weber																			+
<i>Psora crenata</i> (Taylor) Reinke																			+
<i>Psora decipiens</i> (Hedw.) Hoffm.		+																	+
<i>Psora icterica</i> (Mont.) Müll. Arg.																			+
<i>Psora</i> sp. Hoffm.																			+
<i>Psora tuckermanii</i> R.A. Anderson																			+
Ramalinaceae C. Agardh																			

<i>Erpodiaceae</i> Broth.			
<i>Erpodium acrifolium</i> (Purs.)		+	+
Fabroniaceae Schimp.			
<i>Fabronia ciliaris</i> var. <i>wrightii</i> (Sull. Ex Sull. And Lesq.) Buck.		+	+
<i>Fissidentaceae</i> Schimp.			
<i>Fissidens crispus</i> Mont.		+	+
<i>Funariaceae</i> Schwägr.			
<i>Physcomitrium subsphaericum</i> Schimp. Ex C. Muell.		+	+
Pottiaceae Schimp.			
<i>Aloina</i> sp. (Müll.Hal) Kindb.	+		
<i>Aloina hamulus</i> (C. Muell.)		+	+
<i>Didymodon australasiae</i> var. <i>umbrosus</i> (C. Muell.) Zand.		+	+
<i>Didymodon revolutus</i> (Card.) Will.		+	+
<i>Didymodon rigidulus</i> var. <i>gracilis</i> (Hook. And Grev.) Zand.		+	+
<i>Pseudocrossidium aureum</i> (Bartr.) Zand.		+	+
<i>Pseudocrossidium replicatum</i> (Tayl.) Zand.		+	+
<i>Pseudocrossidium replicatum</i> var. <i>longicuspidatum</i> Zand.		+	+
<i>Splachnobryum obtusum</i> (Brid.) C. Muell.		+	+
<i>Trichostomum brachydontium</i> Bruch ex F. Muell.		+	+
<i>Weissia</i> sp. Hedw.			+
<i>Weissia controversa</i> Hedw.		+	+
<i>Weissia jamaicensis</i> (Mitt.) Grout.		+	+
<i>Neohyophyla</i> sp.			+
<i>Neohyophyla sprengelii</i> var. <i>stomatodonta</i> (Card.) Zand.		+	+

BC1: Región central del desierto de Baja California (Flechtner et al., 1998); BC2: Baja California Sur (Maya et al., 2002); BC3: sur de la Península de Baja California (López-Córtés et al., 2010); BC4: sur de la Península de Baja California (Gómez-Sánchez, 2010); BC5 Península de Baja California (Büdel et al., 2013); J1: Llano de Ojuelos, Jalisco (Concostrina-Zubiri et al., 2013); J2: Vaquerías, Jalisco (Concostrina-Zubiri, et al., 2014); SLP1: ejido escalerillas, San Luis Potosí (Jiménez-Aguilar, 2005); SLP2: Loma La Biznaga, San Sebastian, San Luis Potosí (Jiménez-Aguilar et al., 2009); SLP3: ;NL1: Galeana Nuevo León (Molina-Guerra et al 2013); NL2: Noreste de la Región Terrestre Prioritaria 80 "El tokio", Nuevo León y Coahuila; NL (Molina et al., 2014); NL3: área nacional protegida llano La Soledad, Nuevo León (Mendoza-Aguilar, 2014); NL4: área nacional protegida llano La Soledad, Nuevo León (Gutiérrez-Gutiérrez, 2017); P1: Zapotitlán Salinas, valle de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla (Rivera-Aguilar et al., 2006); P2: valle de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla (Rivera-Aguilar et al., 2009); P3: valle de : Zapotitlán Salinas, Puebla (Sandoval-Pérez, et al., 2016); QN: sitio norte Semidesierto Queretano; QC: sitio centro Semidesierto Queretano; QS: sitio sur Semidesierto Queretano.