



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES.

**“Recuperación de biocostra en diferentes condiciones de
perturbación dentro de la Reserva de la Biosfera de
Mapimí”.**

Tesis que presenta:

Arturo Rocha Hernández

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias Ambientales

Directoras de tesis:

Dra. Elisabeth Huber-Sannwald

Dra. Nguyen Esmeralda López Lozano

Asesores:

Dra. Natalia Martínez Tagüeña

Dr. Matthew A. Bowker



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Recuperación de biocostra en diferentes condiciones de perturbación dentro de la Reserva de la Biosfera de Mapimí**” presentada para obtener el Grado de Maestría en Ciencias Ambientales fue elaborada por **Arturo Rocha Hernández** y aprobada el 30 de septiembre de 2024 por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dra. Elisabeth Huber-Sannwald
Co-directora de tesis

Dra. Nguyen Esmeralda López Lozano
Co-directora de tesis

Dra. Natalia Martínez Tagüña
Asesora de tesis

Dr. Matthew A. Bowker
Asesor de tesis



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la codirección de la Dra. Elisabeth Huber-Sannwald y la Dra. Nguyen Esmeralda López Lozano.

Los resultados de esta investigación son parte del proyecto CONAHCYT PRONAI 319-059 - Observatorios Participativos Socio-Ecológicos de zonas áridas. Etapa II: Co-definición y co-generación del conocimiento para la protección de la diversidad cultural y biótica y el desarrollo sostenible" cuyo responsable técnico fue la Dra. Elisabeth Huber-Sannwald.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (1080434) y de la División de Ciencias Ambientales en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

Acta de examen de grado

*Admiro la resiliencia de la
naturaleza tras una perturbación;
me motiva y me da fortaleza.
Si algo tenemos en común las
biocostras y yo, es el suelo y la
vida que renace.*

Dedicatoria

Con especial cariño:

Al personal de la Reserva de la Biosfera de Mapimí, por demostrarme que la vida en el desierto va más allá de lo primero que imaginamos.

A mis profesores de siempre, por encaminarme al mundo de la ciencia.

A Brenda, por explotar mi curiosidad en el mundo del suelo; y a cada uno de mis amigos y roomies, por siempre escucharme, acompañarme y cuidarme en esta etapa tan importante en mi vida.

A mi abuela, por todo su amor.

A Greta y a la memoria de Aria, por acompañarme de principio a fin en este proyecto que hice con mucha ilusión, las llevo siempre en mí corazón.

Agradecimientos

Al equipo de trabajo.

A mis directoras de tesis: Dras. Elisabeth Huber-Sannwald y Nguyen Esmeralda López Lozano por su paciencia y grandes aportaciones en la elaboración de la tesis.

A mis asesores académicos: Dra. Natalia Martínez Tagüña, por sus comentarios en el componente socioecológico de mi trabajo, Dr. Matthew Bowker, por su enorme contribución y conocimiento en el marco de las biocostras.

Al Mtro. Juan Pablo, por su disposición y apoyo en la estandarización de pruebas y análisis en laboratorio. A la Mtra. Carmelita Rocha, por su ánimo y apoyo en el laboratorio.

Al Mtro. Alejandro Malagamba Rubio, por los ánimos y apoyo en campo.

Al Dr. David Douterlungne, por su enorme apoyo en mis modelos estadísticos.

A la Dra. Berenice Celis, y Dra. Aura Ontiveros, por su ánimo en el laboratorio y motivación en todo momento.

Al Dr. Salvador Rodríguez (UNAM), por sus aportaciones en Ecología de suelos.

Al personal del ejido “la Flor”, en la RBM, por su ánimo, entrega y cariño, y hacer de este trabajo una obra de arte para ustedes.

A Sandra y Ricardo, por ayudarme en la colecta de muestras de suelo, en la planeación de mi protocolo de tesis y por el ánimo siempre.

A Erandi, por escucharme y acompañarme en todo momento; por enseñarme GIS y contribuir positivamente a mi trabajo. Te admiro mucho.

A Lupita Medina, por compartirme tu gran conocimiento en la qPC, R, tu motivación y cálida presencia.

A Ángel Estrada, por tu atención y motivación en los inicios de la maestría.

Un especial agradecimiento a Karen, por enseñarme a explorar el mundo microscópico de las biocostras, por tu valiosa disposición y ser siempre mi velita en mis momentos más oscuros de la tesis ¡Gracias!

A mis amigos de siempre:

A Valeria, por siempre escucharme y motivarme, en cada momento complicado.

A Brenda, por tu motivación, admiración y despertar mi curiosidad en lo maravilloso que es el suelo, siempre estuviste presente.

A Nancy y Valery, por todo su cariño incondicional, por hacerme reír, festejar mis logros y acompañarme en mis momentos de crisis.

A Rosa, por todo tu cálido cariño y ayudarme a reconectar conmigo mismo.

A Sandra, por provocar las risas, tu sincera amistad, confianza y cariño.

A Santi, por contribuir positivamente en mi trabajo y en cada paso de mi vida, redescubriendo cada sendero sin importar cuál dirección tomar.

A Paulina, por seguir estando en cada uno de mis proyectos, y acompañarme en cada decisión que tomo en mi vida.

A todos aquellos amigos que me acompañaron y alentaron en este proceso en el que dedique mucho tiempo, energía y amor, desde el día uno hasta la conclusión de mi tesis.

A mis profesores:

Dr. Alfredo Pérez, por encaminarme al sendero de la ciencia; a la Dra. Norma Ordoñez, por motivarme y llevarme hasta aquí con gran pasión por estudiar lo complejo que es el suelo; al Dr. Rafael Castañeda, por marcar mi vida en la expresión y participación social; a la Dra. Guadalupe Pérez, por siempre ver mis cualidades y motivarme a seguir estudiando; y Mtra. Paulina Santana, por su acompañamiento en todo momento.

A mi familia:

A mi abuela por guiarme siempre, cuidarme y confiar en mí. A mi primo Emmanuel por cuidar siempre de mis gatos y apoyarme en mis decisiones. A mi mamá por darme la libertad de elegir lo que amo. A Luis, por tu apoyo en todo momento. A mi papá por los ánimos y motivarme a seguir. A mis mascotas Greta y a la memoria de Aria, por abrazarme cuando se perdía la luz en este camino.

A mi segunda familia que conocí en SLP:

A mis roomies favoritos, por todo su amor, compañía y cuidados en hermandad: Melvin, Javier, Yolanda y a mi colega Lulú. Los atesoro en mi corazón, sin su presencia, no habría sido tan fácil llegar hasta aquí.

A mis compañeros y amigos del IPICYT: Cristopher, Ivonne, Paco, Paola, Aries e Irene, por todo su cariño, motivación y disposición en todo momento. Especialmente a Paloma, Guillermo y Herón, por su gran amistad, confianza, equipo y por siempre sostenernos en lo más complejo que parecía. Y finalmente a Enoé, por tu solidaridad y tu gran corazón.

Gracias a todos y todas, siempre en mi corazón.

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos Institucionales	iii
Acta de examen de grado	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vii
Lista de tablas	xi
Lista de figuras	xii
Anexos	xv
Resumen	xvi
Abstract	xvii
Introducción	xviii
Chapter 1	1
1.1 Introduction	1
1.2 Hypothesis	4
1.3 Main objective	4
1.4 Specific objectives	4
1.5 Methods	5
1.5.1 Study area	5
1.5.2 Collection of microcosms of disturbed soil	7
1.5.3 Collection of biocrust inocula	7
1.5.4 Analysis of biocrust development	10
1.5.5 Statistical analysis	15
1.6 Results	17
1.6.1 Inoculants and soil characterization	17
1.6.2 Development of biocrust	18
1.6.3 Soil Aggregate Stability and Soil Roughness	21
1.6.4 Biocrust cover developed	23
1.6.4 Physicochemical properties of soil during biocrust development	32
1.6.6 Soil moisture fluctuations associated with the development of biocrust	38
1.6.7 Abundance, alpha-diversity and richness of biocrust microbial communities	39

1.7 Discussion	45
1.7.1 Development of biocrust: Effect of irrigation and time in the inoculation of disturbed soil	45
1.7.2 Response of the physicochemical properties of soil in the recovery process of biocrust.	50
1.7.2 Effect of inoculation with different inoculants of biocrusts on the microbial community.	51
1.7.3 Inoculation strategy for biocrust recovery.	54
1.8 Conclusion	56
Capítulo 2	59
2.1 Introducción	59
2.2 Hipótesis	64
2.3 Objetivo general	64
2.4 Objetivo específico	64
2.5 Metodología.	65
2.5.1 Diagnóstico participativo	65
2.5.2 Proceso de Co-diseño	68
2.6 Resultados y discusión	71
2.6.1 Recopilación del conocimiento co-generado en estudios anteriores	71
2.6.2 Co-diseño de infografías: una estrategia integral para el reconocimiento de la función de la biocostra en el sistema socioecológico.	74
2.6.3 Elaboración y evaluación del co-diseño de infografías.	79
2.7 Conclusión	82
3.0 Referencias	85
4.0 Conclusión	101
5.0 Anexos	104

Lista de tablas

Capítulo 1

Table 1. Experimental inoculation (A) and irrigation (B) treatments, biocrust temporal development (C) and experimental design (D)	9
Table 2. Description of biocrust category	13
Table 3. ANOVA Table for Chlorophyll a and EPS content ($*** p < 0.001$, $** p < 0.01$, $* p < 0.05$).	20
Table 4. Soil roughness and soil aggregate stability of the biocrust inoculation experiment under different irrigation conditions. Values depict mean and standard error (n=96). Three-way ANOVA was performed for inocula, irrigation, and time of inoculation variables ($*** p < 0.001$, $** p < 0.01$, $* p < 0.05$).	22
Table 5. Statistical analyses of cover types. P-Value are significantly different when $*** p < 0.001$, $** p < 0.01$, $* p < 0.05$.	24
Table 6. Variance Explained by Principal Components	33
Table 7. Physicochemical properties of soil of microcosms inoculated with different biocrust samples. Values depict mean and standard error (n=96). Different letters indicate significant difference between treatments: biocrust inoculants, irrigation condition, and the time of recovery (ANOVA Tukey $p < 0.05$).	34
Table 8. Values of moisture changes. Generalized Linear Model, t-family distribution.	38
Table 9. Permutational analysis of variance (PERMANOVA) of the composition of the microbial communities considering inocula, irrigation and time after inocula application.	39
Table 10. Linear model for alpha diversity indices.	43

Capítulo 2

Tabla 1. Miembros de la población local del Ejido “La Flor”.	65
--	----

Lista de figuras

Capítulo 1

Fig. 1. Location of the Ejido “La Flor”. 5

Fig. 2. Study area. Desert scrub vegetation (matorral xerófilo) covering the “La Lengua” or “Los Altos” landscape unit in the ejido La Flor of the Mapimi Biosphere Reserve. Highly impacted by livestock with sparse biocrust cover on soil (A); Conserved area inside livestock enclosure with dense layer of dark biocrust (B). 6

Fig. 3. Exopolysaccharide content (Loosely bound, LB-EPS; Tightly bound, TB-EPS) (A) and Chlorophyll a concentration (B) before inoculation. Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis); soil (microcosm of disturbed soil without inocula of biocrust). Different letters above bars indicate significant difference (One-Way ANOVA, Tukey mean comparison test $p < 0.05$). 17

Fig. 4. Chlorophyll a production. A. Irrigation by time interaction ($F_{1, 80} = 5.111$, $p = 0.0265$); B. Inocula by time interaction ($F_{3, 80} = 10.835$, $p < 0.001$). Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis); soil (microcosm of disturbed soil without inocula of biocrust). Different letters above bars indicate significant difference (Three-way ANOVA, Tukey mean comparison test, $p < 0.05$). 18

Fig. 5. EPS production after inoculation. EPS (LB-EPS, TB-EPS) concentration at before inoculation (zero months) 3 and 6 months after inoculation. Different letters above bars indicate significant difference (Three-way ANOVA, Tukey $p < 0.05$; LB-EPS data with sqrt-transformation). 19

Fig. 6. Soil aggregate stability. A. Response to water treatments: minimum (min) and maximum (max) irrigation ($F_{1, 80} = 27.099$, $p < 0.001$). B. Response to time before inoculation (0 months) and after inoculation (3 and 6 months; $F_{1, 80} = 4.791$, $p = 0.0315$). Different letters above bars indicate significant difference. 21

Fig. 7. Soil surface roughness. A. Before inoculation (0 months) and after inoculation (3 and 6 months $F_{1, 80} = 12.836$, $p < 0.001$); B. Considering inoculants treatments ($F_{3, 80} = 1.986$, $p = 0.0179$). Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis); soil (microcosm of disturbed soil without inocula of biocrust). Different letters above bars indicate significant difference (Three-Way ANOVA, irrigation effect in the time, $p < 0.05$; Tukey 0.05). 22

Fig. 8. Percentage of biocrust cover developed in the biocrust inocula treatments, irrigation conditions and time after inoculation. A. Soil microcosms without inocula (only disturbed soil exposed to minimum and maximum irrigation conditions). B. Treatments inoculated with Light crust from disturbed site (LCdis); C. Treatments inoculated with Light crust from

conserved site (LCcon) and, D. Treatments inoculated with dark crust from conserved site (BCcon). 23

Fig. 9. Decreased bare soil over time. Different letters indicate difference between groups, PERMANOVA-Pairwise; Table A 1). 26

Fig. 10. Recovery of light crust coverage. Comparison by: Inocula (A); Irrigation (B); Time (C); Inocula*Irrigation (D); Inocula*Time (E); and Irrigation*Time (F). *Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis), with minimum (Min) and maximum (Max) irrigation conditions. Different letters indicate significant difference Generalized Linear Models (GLM, t-family, R² marginal: 0.994; Table A 2).* 27

Fig. 11. Recovery of dark crust coverage. Comparison by Inocula (A), Irrigation (B), Time (C), Inocula*Time (D), Irrigation*Time (E). *Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis), with minimum (Min) and maximum (Max) irrigation conditions. Different letters indicate significant differences, Linear Regression Model (LM R²/R² adjusted 0.595 / 0.518; Table A 3).* 29

Fig. 12. Recovery of lichen coverage. Comparison by Inocula (A), Irrigation (B), Time (C), Inocula*Time (D), Irrigation*Time (E) and observed lichens species (F). *Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis), with minimum (Min) and maximum (Max) irrigation conditions. Different letters indicate significant difference, Linear Regression Model (LM R²/R² adjusted 0.531 / 0.441; Table A 4).* 31

Fig. 13. PCA of soil physicochemical properties considering temporal development and irrigation treatments. The size of vectors is proportional to the percentage of contribution in the components. 32

Fig. 14. Daily soil moisture fluctuations. A. Influence of biocrust inoculants and irrigation treatments. B. Daily maximum, minimum and average ambient temperature in greenhouse (°C). 38

Fig. 15. Bacterial community composition of biocrust inoculation treatments. *Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis), with minimum (Min) and maximum (Max) irrigation conditions at three months (T3) and six months (T6) after inocula application. Heatmap was created with the average of the relative abundance of the Class. Clustering is based on Bray Curtis distance.* 40

Fig. 16. Composition of biocrust bacterial communities at phylum level. A. Inocula, B. Irrigation, C.me after inoculation D. General composition. *Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis), under in minimum (Min), maximum (Max) irrigation conditions and no irrigation (NA), at time (zero – before inoculation), three months (T3) and six months (T6) after inoculation. Number 1 to 6 refer to the six replicates.* 42

Capítulo 2

Fig. 17. Etapas del co-diseño de infografía.	68
Fig. 18. Integración de los servicios ecosistémicos asociados a la biocostra.	73
Fig. 19. 1er Producto del co-diseño. Funcionamiento de la biocostra en el desierto.	76
Fig. 20. 2do producto de co-diseño. Influencia de la biocostra en las actividades económicas.	77
Fig. 21. 3er producto del co-diseño. Regulación hídrica de la biocostra.	78
Fig. 22. Resultados de la evaluación de infografías. El cuestionario fue aplicado a una población de 50 personas ($N=50$).	80

Anexos

Capítulo 1.

Fig. A 1. Installation and random distribution for experiment. A. Size of soil core and process of collection soil samples in the study of area. B. arrangement and labeling of soil cores according to the experimental design treatments. 104

Fig. A 2. Monthly development of biocrust in disturbed soil microcosm inoculated with different inoculants of biocrust under maximum and minimum irrigation conditions. 105

Table A 1. Summary Generalized Linear Models (GLM; t-family distribution) for bare soil decreased. 106

Table A 2. Summary Generalized Linear Models (GLM; t-family distribution) for light crust cover. 107

Table A 3. Summary linear regression model (LM) for black crust cover. 108

Table A 4. Summary linear regression model (LM) for lichen cover. 109

Table A 5. ANOVA of physicochemical properties of soil. Three-way ANOVA values was performed for inocula, irrigation, and time of inoculation variables (** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$). 110

Capítulo 2.

Tabla A 1. Cuestionario de evaluación interna para cada una de las infografías co-diseñadas. 113

Tabla A 2. Evaluación externa para la comprensión de cada una de las infografías co-diseñadas. 114

Resumen

Recuperación de biocostra en diferentes condiciones de perturbación dentro de la Reserva de la Biosfera de Mapimí.

Las biocostras son comunidades diversas de cianobacterias, líquenes, algas, hongos y musgos que colonizan el suelo en ambientes extremos de zonas áridas y semiáridas, desempeñando funciones en el sistema socioecológico relacionadas con la infiltración de agua, la fijación de carbono y nitrógeno, la estabilidad del suelo y la diversidad de microorganismos del suelo. La actividad ganadera en las tierras áridas ocasiona la degradación del suelo y la desertificación. En los últimos 10 años, el uso de biocostra en forma de inóculos se ha empleado para la rehabilitación y restauración de ecosistemas degradados en zonas áridas. En esta investigación se examina el proceso de recuperación de biocostra a partir de la inoculación de biocostras provenientes de un sitio perturbado por la ganadería y uno conservado sin ganadería, en núcleos de suelo perturbado. Los tratamientos inoculados se sometieron a dos tipos de condiciones de riego. Evaluamos la recuperación de biocostra antes de la inoculación y tres y seis meses después de la inoculación. El suelo desnudo disminuyó significativamente a partir de la inoculación de biocostra. Los pulsos mínimos de riego favorecieron el desarrollo de cobertura de biocostra clara (dominada por cianobacterias tempranas), mientras que el riego máximo favoreció el desarrollo de cobertura de biocostra intermedia (cianobacterias de pigmento oscuro) y biocostra más desarrollada (cianobacterias y liquen). Los tratamientos inoculados no presentaron diferencias en la composición microbiana, sin embargo, en las condiciones de riego y tiempo de inoculación, cambiaron significativamente. Todos los inóculos de biocostra desarrollaron cobertura de biocostra; sin embargo, los tratamientos inoculados con la biocostra del sitio perturbado produjeron mayor contenido de clorofila a. El aumento de EPS en los seis meses de inoculación, incrementaron la estabilidad de agregados y rugosidad de la biocostra. Nuestros resultados analizan el funcionamiento de la recuperación de biocostra y contribuyen al desarrollo de estrategias de restauración y/o rehabilitación de funciones del suelo en las zonas áridas, ya que las biocostras desarrollan diferentes funciones ecológicas según el riego y tiempo de inoculación. Así mismo se integró un proceso de co-diseño de infografías cuyo objetivo es comunicar el proceso de recuperación de biocostra en el suelo perturbado por la ganadería, y los servicios ecosistémicos que produce la biocostra y su influencia en las actividades económicas como el ecoturismo, la conservación y la ganadería en la Reserva de la Biosfera de Mapimí, a fin de generar nuevas estrategias de gestión de la tierra frente a los escenarios de degradación de la tierra.

Palabras clave: biocostra, restauración, zonas áridas, inoculación de biocostras, ganadería, co-diseño, servicios ecosistémicos

Abstract

Recovery of biocrust under different disturbance conditions within the Mapimí Biosphere Reserve.

The biological soil crust or biocrusts is a thin layer on the soil surface created and inhabited by a community of cyanobacteria, lichens, algae, fungi and mosses in different proportions, which colonize the soil under extreme conditions of arid and semi-arid zones, performing ecological functions related to water infiltration, carbon and nitrogen fixation, soil stability and the diversity of soil microorganisms. Livestock activity in drylands contributes to continuous soil degradation and desertification. In the last 10 years, the use of biocrust in the form of inocula has been employed for the rehabilitation and restoration of disturbed ecosystems in arid zones. This research examines the process of biocrust recovery from the inoculation of biocrusts sourced from a site disturbed by livestock and one conserved without livestock, in disturbed soil cores. The inocula treatments were exposed to two types of irrigation conditions. We evaluated biocrust recovery before inoculation and three and six months after inoculation. Bare soil decreased significantly after inoculation with biocrust. The minimum irrigation pulses favored the development of light biocrust cover (dominated by early successional cyanobacteria), while maximum irrigation favored the development of mid-successional biocrust cover (darkly pigmented cyanobacteria) and even more developed biocrust (cyanobacteria and lichen). The inocula treatments showed no differences in microbial composition; however, under irrigation conditions and time after inoculation, they changed significantly. All biocrust inocula developed biocrust cover; however, treatments inoculated with the biocrust from the disturbed site produced higher chlorophyll a content. The increase in EPS over the six months of inocula increased aggregate stability and roughness of the biocrust. Our results analyze the functional outcomes of the biocrust recovery and contribute to the development of strategies for the restoration and rehabilitation of soil functions in arid zones, since biocrusts develop different functions depending on the irrigation and time since inoculation. Likewise, a process of co-design of infographics was integrated with the objective of communicating the biocrust recovery process in the soil disturbed by livestock, and the ecosystem services produced by the biocrust and its influence on economic activities such as ecotourism, conservation, and livestock management in the Mapimí Biosphere Reserve, to generate new land management strategies in the face of land degradation scenarios.

Keywords: biocrust, drylands restoration, inoculation by biocrust, livestock, co-design, ecosystems services.

Introducción

Los ecosistemas áridos y semiáridos representan aproximadamente el 40% de la superficie terrestre del planeta y son caracterizados por bajas precipitaciones, alta evaporación y poca vegetación (FAO, 2008). Más del 75 % se encuentra degradada y puede aumentar hasta el 90 % al 2050 (World Atlas of Desertification, 2018). La desertificación, la pérdida de biodiversidad, la variabilidad climática y la degradación del suelo, representan los mayores desafíos que enfrentan estas zonas (UNEP, 2017). La implementación de prácticas para el manejo sostenible y la restauración de estos ecosistemas, son esenciales para su conservación y para el bienestar de las comunidades locales (Reynolds *et al.*, 2007). En México, desde el centro hacia el norte, las zonas áridas cubren más de la mitad del territorio y son altamente vulnerables a la degradación, debido a las actividades antrópicas, como la ganadería, una de las actividades económicas en la zona norte. La interacción entre los ecosistemas y las comunidades humanas que dependen de los recursos de la región, conforman un sistema socioecológico (SSE), cuya estructura, funcionamiento e integración del sistema, se encuentra formado por la relación humano-naturaleza (Berkes *et al.*, 2000; Challenger & Clegg, 2011). Las zonas áridas y semiáridas desempeñan un papel importante en la regulación del clima global y del ciclo del carbono, ya que las plantas y los suelos en estas áreas actúan como sumideros de carbono, ayudando a mitigar el cambio climático (Wang *et al.*, 2012). Además, habitan una amplia biodiversidad de microorganismos adaptada a condiciones extremas, como las comunidades microbianas del suelo que conforman la costra biológica del suelo, denominada 'biocostra'. Esta comunidad microbiana compuesta por hongos, bacterias, líquenes, algas, cianobacterias y musgos forman parte de la superficie de los suelos, promoviendo su protección ante diferentes eventos de perturbación, de forma natural o antrópica, como la actividad ganadera.

La composición microbiana de la biocostra confiere efectos importantes en la estructura del suelo (Bastida *et al.*, 2010), ya que además de fijar el carbono y nitrógeno (Bowling *et al.*, 2011), la producción de exopolisacaridos (EPS) agrupa las partículas del suelo, mejorando su estabilidad y la formación de la biocostra; mientras que, la producción de pigmentos fotosintéticos, confiere adaptabilidad y resistencia a la radiación UV (Belnap *et al.*, 2016; Rossi *et al.*, 2017). Por otra parte, las cianobacterias que integran a la biocostra, confieren el desarrollo de cobertura y rugosidad, favoreciendo la escorrentía e infiltración, así como la humedad del suelo (Chamizo *et al.*, 2020; X. R. Li *et al.*, 2012; Z. Li *et al.*, 2021). Los musgos y líquenes en conjunto, estabilizan el suelo con la penetración de raíces y talo,

respectivamente (Eldridge & Rosentreter, 1999); aunque de manera conjunta, las hifas de los hongos, y los filamentos de las cianobacterias conforman una red celular dirigida a la formación de la biocostra, la cual protege al suelo de la erosión (Belnap *et al.*, 2003; Bowker, 2007; Langhans *et al.*, 2010). Además, las biocostras sucesivas (oscuras) pueden presentar musgos y líquenes capaces de mejorar el flujo de CO₂ y N comparado con las biocostras sucesivas tempranas (claras), las cuales están compuestas en su mayoría por cianobacterias (Bowling *et al.*, 2011; Grote *et al.*, 2010). Las funciones de la biocostra en el sistema socioecológico, dependen de factores abióticos, como la disponibilidad del agua, la temperatura y la humedad (Bowling *et al.*, 2011). Sin embargo, aunque las biocostras sean altamente resistentes al estrés por sequía y radiación UV, presentan una baja resistencia a la perturbación por compresión (Belnap *et al.*, 2003). Por lo que el paso del ganado en estas zonas puede eliminar o afectar la cobertura de la biocostra, generando la erosión del suelo.

Las biocostras son pieza clave en los ecosistemas áridos y semiáridos, en donde convergen con las poblaciones locales que habitan estas tierras, conformando la estructura y el funcionamiento del sistema socioecológico, controlando diversas funciones para su regulación, como el control de la erosión, la regulación del agua, el clima y la calidad del aire, además de tener un valor estético y cultural (Rodríguez-Caballero *et al.*, 2018). Estas funciones comprenden los servicios ecosistémicos generados por las biocostras, los cuáles requieren de una perspectiva de investigación socio-ecológica que informe a la sociedad sobre el papel de las biocostras y las estrategias para el manejo de recursos, la conservación y la restauración de las zonas áridas degradadas (López-Rodríguez *et al.*, 2020). En la última década, la restauración de estas tierras ha cobrado relevancia, a partir del uso de la biocostra, acelerando la recuperación del suelo (Antoninka *et al.*, 2020). Sin embargo, estos esfuerzos pueden disminuirse, a falta del reconocimiento funcional de la biocostra en los sistemas socio ecológicos, principalmente entre los tomadores de decisiones, en los que intervienen las comunidades locales, gobiernos, organizaciones locales y académicos.

En la Reserva de la Biosfera de Mapimí (RBM), la comunidad local del Ejido “La Flor”, utiliza los recursos naturales que les provee el ecosistema para el desarrollo de la actividad ganadera y el ecoturismo; en el cual se incursionan actividades de educación ambiental. Sin embargo, la vulnerabilidad de estos socio-ecosistemas a la degradación del suelo y a la desertificación, amenazan la seguridad alimentaria y la estabilidad económica (UNCCD,

2017). En una investigación participativa realizada por Monterrubio (2020), se exploró la respuesta socio-ecohidrológica de la biocostra en el sistema socio ecológico, reconociendo la relación ecológica entre la biocostra y el recurso hídrico, así como también los beneficios que los pobladores locales obtienen a partir de la ganadería, la conservación y el ecoturismo. Sin embargo, se identificó la necesidad de generar estrategias para difundir y comunicar la funcionalidad de la biocostra entre los actores del sistema socioecológico. El Ejido “La Flor” presenta un amplio historial de ganado desde sus inicios en 1880, lo que ha provocado en la actualidad una disminución en la cobertura vegetal y un incremento de la erosión ocasionado por el pisoteo del ganado, lo que ha permitido a los pobladores implementar diferentes estrategias para su manejo y el mejoramiento de estrategias dirigidas a la conservación y sostenibilidad con la participación de otros actores como la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y Pronatura Noreste (Monterrubio, 2020). Actualmente, existe una zona degradada donde prevalece una mayor intensidad de ganado y una zona dedicada a la conservación, en donde el ganado se encuentra excluido; existiendo diferentes morfotipos de biocostra en una misma unidad de paisaje denominada “Los Altos o la Lengua”, la cual presenta el mismo tipo y textura de suelo. En la zona conservada, existe la biocostra clara, mayormente dominada por cianobacterias tempranas, y en la zona conservada se encuentran las biocostras oscuras, dominadas por cianobacterias de pigmentación oscura y las biocostras dominadas por una mayor cobertura de liquen. Por lo que examinar el proceso de recuperación de la biocostra en muestras de suelo perturbado por la ganadería, bajo los efectos del cambio en los patrones de lluvia, mediante la inoculación de diferentes propágulos de biocostra y su reconocimiento funcional en el sistema socioecológico, permite responder las preguntas que motivan al desarrollo de esta investigación.

En el capítulo 1, se examina el proceso de recuperación de biocostra comparando diferentes condiciones de riego, asociadas a los niveles de precipitación que ocurren en la RBM, las cuales representan el escenario de variabilidad climática, el cual afecta el desarrollo de la biocostra en el sistema socioecológico; analizando la influencia de los inóculos de biocostra provenientes de un sitio conservado (sin ganadería) y un sitio perturbado (con alta intensidad de ganadería), en núcleos de suelo perturbado por el pisoteo del ganado. Para evaluar el proceso de recuperación de biocostra en los núcleos de suelo, después de la inoculación con diferentes tipos de biocostra, se midieron parámetros asociados a una escala macro, por ejemplo: el desarrollo de cobertura de biocostra, la estabilidad de agregados del suelo, la rugosidad de la superficie y la humedad.

Mientras que en escala micro se cuantificaron parámetros fisicoquímicos y biológicos, por ejemplo: la producción de clorofila a, el contenido de exopolisacáridos (EPS), la concentración de micronutrientes y bases intercambiables en el suelo, además del pH y la conductividad, así como la secuenciación del gen 16S rRNA y la diversidad alfa de la comunidad microbiana de la biocostra desarrollada.

La recuperación de la biocostra en los tratamientos inoculados con biocostras del sitio perturbado, mostró una mayor producción de clorofila a, lo que sugiere una colonización y proliferación de cianobacterias y otros organismos fotosintéticos en la superficie del suelo. Este proceso es esencial para la formación y el mantenimiento de la biocostra, siendo necesario para la estabilización del suelo y la recuperación de áreas degradadas (Bowker *et al.*, 2008). Además, una cantidad mayor de riego en los tratamientos promovió una mayor estabilidad de los agregados del suelo, la rugosidad de la superficie, y la producción de EPS y clorofila a.

El desarrollo de la cobertura de biocostra fue distinto en las condiciones de riego. Los pulsos mínimos de riego favorecieron el desarrollo de la biocostra clara, pero no para la biocostra oscura y líquen, las cuáles se desarrollaron mayormente en pulsos grandes de riego. El suelo desnudo en los núcleos de suelo perturbado disminuyó significativamente tras la inoculación. A los tres y seis meses después de la inoculación, los parámetros evaluados a micro y macro escala mostraron incrementos, evidenciando el éxito de la recuperación de la biocostra en suelos degradados. Similarmente, las condiciones de riego influyeron en la composición de la comunidad microbiana de los tratamientos. La abundancia de Firmicutes aumentó con pulsos grandes de riego, y progresivamente a los tres y seis meses después de la inoculación, lo que explica el incremento de los parámetros a micro y macro escala influenciados por el riego y el tiempo de inoculación. Estos resultados obtenidos contribuyen positivamente a la función de la biocostra y su recuperación en suelos degradados.

En el capítulo 2, se explora el proceso de co-diseño de infografías entre grupos locales (pobladores, organizaciones civiles) y académicos, destacando la interacción entre la biocostra y las actividades económicas del Ejido, y los servicios ecosistémicos, a fin de reconocer su importancia vital para el bienestar humano. Durante el co-diseño de infografías se buscó responder ¿Cómo se puede integrar el conocimiento local sobre las biocostras a través del co-diseño de infografías informativas? y ¿Cómo puede el co-diseño

de infografías facilitar una mejor comprensión del papel funcional de la biocostra en el ejido “La Flor” en la RBM, desde una perspectiva socio ecológica?

Esta colaboración permitió sintetizar la complejidad del sistema en elementos gráficos accesibles, promoviendo la comprensión pública sobre la importancia de las biocostras en las zonas áridas, sin dejar de lado las actividades económicas prioritarias: la ganadería, el ecoturismo y la conservación. Las infografías co-elaboradas sugieren fortalecer las actividades de educación ambiental realizadas como parte del ecoturismo en el ejido, contribuyendo así a la divulgación de la importancia de las biocostras, ampliando su visión sobre la conservación y la protección de otros entornos naturales. Así mismo, el conocimiento co-generado mediante las infografías puede tener un impacto significativo en la toma de decisiones entre los grupos de interés, además al utilizar datos y hechos basados en investigación participativa, permite respaldar argumentos o decisiones. Fortaleciendo la posición de los grupos de interés al presentar información clara y respaldada por evidencia científica ya que, al presentar información de manera visual y fácil de entender, pueden servir como punto de partida para discusiones constructivas que influyan en la toma de decisiones colaborativas, como la conservación de la biocostra y el manejo sostenible en las zonas áridas.

1.1 Introduction

Mexico's drylands cover more than half of the territory and are located mainly in the northern regions of the country. Drylands are highly vulnerable to land degradation due to livestock grazing, an important economic activity in this area (Briones *et al.*, 2018; FAO, 2015), and due to long periods of drought causing plant cover loss. The combined effects of land use change and climate change trigger soil erosion, dust emissions and threaten ecosystem productivity jointly paving the way for desertification, thus negatively impacting human well-being (FAO, 2015). It is estimated that more than 75% of the planet's land surface is disturbed and this percentage may increase up to 90% by 2050 (Cherlet *et al.*, 2018).

Over the past ten years, the use of soil biocrust inocula for the rehabilitation of ecosystem services, mainly regulating and supporting services, has been studied in controlled experiments and *in-situ* (Antoninka *et al.*, 2020; López-Rodríguez *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2016). The biological soil crust or biocrust is a thin layer on the soil surface created and inhabited by a community of cyanobacteria, lichens, algae, fungi and mosses in different proportions. They play important roles in the functioning of these ecosystems, e.g., interacting with vascular plants, fixing carbon dioxide, fixing atmospheric nitrogen, stabilizing soil surfaces and contribute to the formation of soil aggregates, and pervasively influence water retention in and hydrology of the soil (Belnap *et al.*, 2003). Depending on soil texture by livestock trampling can decrease biocrust cover more so in sandy soils than in clay soils (Belnap *et al.*, 2003; Weber *et al.*, 2022). Actively inducing biocrust recovery by inoculating biocrust propagules reduces soil loss mainly due to wind and water erosion and avoids desertification scenarios. These seem potentially approaches to rehabilitate the affected drylands to improve the functioning of land use systems such as pastures, ecosystem services, and the local economy (López Reyes, 2001).

The development of biocrust is strongly dependent on the amount of water received. Therefore, the availability of water and water retention capacity of soil are critical aspects to be considered for ecosystem restoration, although some biocrust are more tolerant to hydration-dehydration processes. The production of exopolysaccharide (EPS) by microorganisms helps bind soil mineral particles, thereby contributing to soil aggregate stability, the formation of biocrusts and the protection against drought stress (Chamizo *et al.*,

2018; Karimi *et al.*, 2022). The concentration of EPS in soils regulate hydrological processes such as runoff and infiltration (Fischer *et al.*, 2010; Karimi *et al.*, 2022; Kidron, 2019; Kidron *et al.*, 2020). Consequently, physical parameters associated with water use, such as EPS, hydrophobicity, runoff and infiltration rate, should be key criteria when selecting potential biocrust inocula for restoration purposes (Kakeh *et al.*, 2021; Mallen-Cooper *et al.*, 2020).

The amount of chlorophyll *a* indicates the photosynthetic capacity of the biocrusts and is an indicator of success in their recovery process, since cyanobacteria represent the majority of their microbial composition and therefore allow for rapid establishment (Chamizo *et al.*, 2020; Kidron, 2021; Mallen-Cooper *et al.*, 2020; Mugnai *et al.*, 2018; Roncero-Ramos *et al.*, 2019). Likewise, the production of photosynthetic pigments confers adaptability and resistance to UV radiation (Belnap *et al.*, 2016; Rossi *et al.*, 2017). The microbial composition of the biocrust confers important effects on soil structure, a useful indicator of soil quality (Bastida *et al.*, 2010). Mosses and lichens stabilize the soil when their rhizoids and rhizines, respectively, anchor them to the soil (Eldridge & Rosentreter, 1999). In case of fungi and cyanobacteria it is the hyphae and filaments, respectively that form cellular networks and protect the soil from erosion (Belnap *et al.*, 2003; Bowker, 2007; Langhans *et al.*, 2010).

While the recovery of biocrust has been studied under mechanical disturbances such as scraping or simulated trampling of the biocrust cover in cold and hot climates (Caster *et al.*, 2021), some studies have examined the recovery potential under a climatic disturbance scenario with variation in temperature and precipitation (Phillips *et al.*, 2022) recognizing that the diversity, composition, distribution of functional groups of biocrust communities can change along a precipitation gradient in hyper-arid, arid, and semi-arid (Su *et al.*, 2020) and sub-humid (Corbin & Thiet, 2020) regions. In addition, diverse functional responses of biocrust such as C, N fixation, and P mineralization have been examined under different precipitation conditions (Aranibar *et al.*, 2022).

While most biocrust restoration studies have used cultivated biocrust inoculant, the proposal of using local naturally-occurring biocrust material to restore disturbed land (Antoninka *et al.*, 2019) opens a new scenario for experimentation; local biocrust samples may either be resistant to disturbance or originate from an ecosystem state with a lower disturbance impact (Berdugo *et al.*, 2020; Phillips *et al.*, 2022). With respect to biocrust taxa, in disturbed and early successional sites, algae and cyanobacteria adhere to the exposed soil particles and gradually accumulate organic matter (Eldridge *et al.*, 2006; Fischer, Veste, Schaaf, *et al.*,

2010). In less disturbed sites, however bryophytes and lichen often come to displace algae and cyanobacteria during the successional recovery process (Corbin & Thiet, 2020; Fischer *et al.*, 2014; Gypser *et al.*, 2015).

In this research, we answer the following questions: how does biocrust cover and composition, surface roughness, and soil stability re-establish from biocrust inocula samples coming from two different sites, one heavily impacted by high livestock intensity and the other one from site protected in a livestock enclosure for the last 10 years? How do different precipitation patterns influence these recovery processes? And finally, how do soil physical and chemical characteristics change during the establishment phase of the different biocrust inocula in association with the developing microbial communities, considering small and large rain pulses?

1.2 Hypothesis

- I. With biocrust inoculants from a conserved site, the process of biocrust recovery measured by the development of cover, soil roughness, soil stability (exopolysaccharides concentration), productivity (chlorophyll a content), and soil fertility (mineral nutrient concentration) on incubated soil cores, will occur at a faster rate than with biocrust inoculants from a disturbed site; furthermore, the large pulse precipitation treatment will favor this enhanced response pattern compared to the small pulse treatment.
- II. The composition of the microbial community changes continuously through rainfall patterns, manifesting more significant microbial activity in rainy conditions than in drought. This activity favors the recovery of the biocrust, allowing higher stability and rehabilitation of soil functions.

1.3 Main objective

The main objective of this experimental work was to examine the process of biocrust recovery under contrasting rainfall conditions by comparing the influence of biocrust inocula from a conserved site (without livestock) with that of a disturbed site (high stocking rate) in microcosms of soil from disturbed sites.

1.4 Specific objectives

1. Examine the development of three biocrust inoculants compared to bare soil under varying conditions of water availability for six months. Using soil samples from a disturbed site applying micro- and macro-scale parameters: biocrust cover, soil roughness and stability, chlorophyll a content, exopolysaccharide (EPS) production, moisture content and physicochemical properties.
2. Examine the influence of different inocula treatments of biocrust, precipitation and recovery time on the development of microbial community composition based on 16S rRNA gene sequencing over time (3 and 6 months).

1.5 Methods

1.5.1 Study area

The Mapimí Biosphere Reserve (MBR) is situated in the Chihuahua Desert in Central North Mexico, forming the endorheic basin “Mapimí Bolson”; whose altitude ranges from 1,159 m a. s. l. to 1,159 m a.s.l. It is located in the states of Durango (62.89%), Coahuila (22.45%), and Chihuahua (14.67%), with a total area of 342,387 hectares (Fig. 1) (DOF, 2000).

According to the Köppen classification, adapted by García (1973), the climate is described as very arid and semi-hot, with summer rains and a large thermal amplitude (BWhw). Over the past 30 years, the average annual precipitation has been 263 mm, with a maximum of 512 mm and a minimum of 80 mm; 71% of the rainfall occurs between June and September, and the annual average of rainy days is 40 mm. The average annual temperature is 20.8°C, with significant seasonal variation. In winter, the average temperature is 11.6°C, with a minimum of 3.9°C in January; while in summer, the average temperature is 27.9°C, reaching a maximum of 37.41°C in June (Cornet, 1988; SMN, 2021)

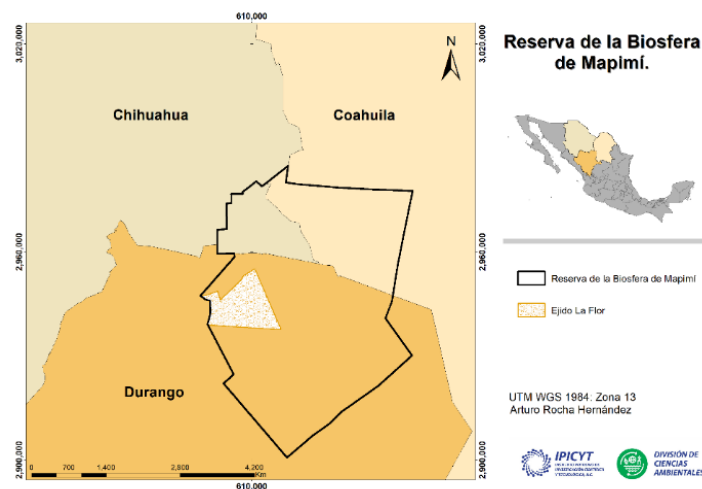


Fig. 1. Location of the Ejido “La Flor”.

The vegetation in Ejido La Flor is characterized by grassland, predominantly featuring wolfgrass (*Pleuraphis mutica*) and alkali sacaton (*Sporobolus airoides*). Additionally, there is a type of vegetation corresponding to xerophilous scrub, with dominant species including creosote bush (*Larrea tridentata*) and mesquite (*Prosopis glandulosa*), which are shrubs ranging from 50 to 200 cm in height (CONANP, 2006). The soil types present in the study area include luvic yermosol (covering 53.7%), calcareous regosol (covering 35%), and

haplic xerosol (covering 11.3%). These soils are characterized by being light-colored, having high concentrations of salts, and accumulating clay minerals. Soil texture of study area and the microcosms corresponds to a clay-loam soil (38% sand, 30% loam and 24% clay).

Extensive livestock production has been an important socio-economic activity throughout the MBR since the 19th century. Starting at the beginning of the 21st century, ecotourism and conservation programs began to develop in conjunction with civil and governmental associations such as PRONATURA Noreste and CONANP, respectively. The study area is situated in the ejido "La Flor" in the area known as the "La Lengua" or also known as the "Los Altos". This zone forms a landscape unit due to its homogeneity in geological, edaphic and vegetative characteristics, which is affected by occasional flooding due to its high runoff, favoring the development of annual plants, which serve as an important source of food for livestock.

According to the local population, this landscape unit has low forage production for livestock, which is why it is considered a "passage" site for livestock. The constant movement of livestock affects soil structure and promotes soil loss by wind and water erosion. This landscape unit has two sites of interest. The first corresponds to a disturbed site due to the high intensity of livestock and the second is a conserved site (Fig. 2), in which livestock is excluded, preventing the passage of any animal because it is designated for the conservation of the desert tortoise (*Gopherus flavomarginatus*). For the purpose of this study, this area corresponds to the "disturbed site" (Fig. 2-A); within this area a cattle enclosure was established at the end of the 19th century (Gómez & Dirzo, 1995) "conserved site" (Fig. 2-B).

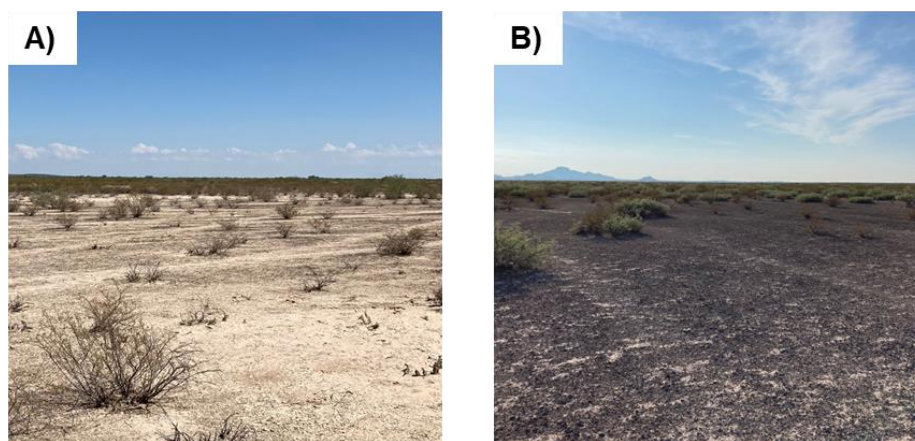


Fig. 2. Study area. Desert scrub vegetation (*matorral xerófilo*) covering the "La Lengua" or "Los Altos" landscape unit in the ejido La Flor of the Mapimi Biosphere Reserve. Highly impacted by livestock

with sparse biocrust cover on soil (A); Conserved area inside livestock enclosure with dense layer of dark biocrust (B).

1.5.2 Collection of microcosms of disturbed soil

The soil and biocrust samples were collected in June of 2021 in the landscape unit called "Los Altos". At the study site, eight transects of 30 m each were identified based on the functionality of the landscape and the number of livestock trails (Monterrubio, 2020; Ramírez-Carballo *et al.*, 2011). Along each transect we pounded 15 PVC tubes (3 inch diameter x 7 cm depth) (350 g of capacity soil) at a depth of 6 cm into wet soil and carefully withdrew the tubes from the soil with a shovel. We put cotton fiber on the surface of the soil contained in the PVC tube to avoid soil fracture during subsequent transportation. The lower and upper part of the PVC tube was covered with aluminum foil and masking tape. We put each PVC tube in a box and stored the samples in coolers for transportation to the Soil Ecology Laboratory at the Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. We collected a total of 132 soil cores, and the soil sampling was carried out by means of cores to maintain its structure and avoid rupture. The soil cores were taken randomly, considering a minimum distance of 1 to 3 m from livestock trails and the *Larrea tridentata* canopy. These soil cores served as our experimental units.

1.5.3 Collection of biocrust inocula

For the collection of biocrust inocula of the biocrust in disturbed site, we collected biocrusts dominated by cyanobacteria and some isolated lichens and cyanobacteria dominated biocrust. While conserved site, we collected biocrusts dominated by cyanobacteria and lichens. We randomly collected biocrust samples in each area of study (Fig. 2) in a plastic bag (1kg of capacity) within a radius of 10 m around the transect. For the samples soil we selected soil with maximum 0-25 % biocrust cover in a disturbed soil area. We used disinfected (with ethyl alcohol) metal spatulas at each transect. The collection points were selected randomly in the interspaces, avoiding patches covered by vascular plants and with a minimum distance of 3 m from the canopy of *L. tridentata* and 1 to 3 m from livestock trails. The top 0.5 cm biocrust cover including the biocrust and the adherent soil particles were carefully sampled removing any excess soil with a spatula (Bowker *et al.*, 2019). The collected biocrust samples and soil cores were placed at room temperature for two weeks inside the greenhouse at room temperature at IPICYT until they were used as inocula.

Inocula preparation

We fragment manually pieces of biocrust and passing them through a 2 mm mesh, strictly following disinfection protocols and maintaining aseptic conditions, to avoid any cross-contamination when handling different inocula types to spread on the surface on each soil microcosm. To standardize the amount of inocula, the surface layer (0.5 cm) of an uninoculated soil core was extracted; its weight was taken to calculate 25% by weight of the soil surface (Bowker *et al.*, 2017), obtaining 3.71 g of biocrust inocula for each core of soil.

Irrigation conditions

We estimated the amount of water per irrigation treatment (ml/cm²) considering the area and volume of the soil core. The two water treatments corresponded to typical maximum and minimum rainfall events (Table 1-B); the different volumes of irrigation (minimum event: 4.41 ml/cm², maximum event: 31.63 ml/cm²) were applied twice a week (Monday and Thursday) at the same time of the day (18:00 hrs). We used distilled and sterile water and applied the water by dripping it manually from a syringe in a spiral pattern over the core (Antoninka *et al.*, 2019).

Design of experiment

The experiment was set up in an uncontrolled greenhouse. We arranged the soil microcosms in blocks of sampling. The experimental design considered six replicates per treatment, designed in three temporal groups of samples (Table 1-D). randomly distributing the inoculated samples (Fig. A-1). The sampling times were at 3 and 6 months post inoculation, according to the minimum biocrust recovery time (Chamizo *et al.*, 2020; Fick, Day, *et al.*, 2019). For each treatment during the sampling times, we sacrificed the experimental units to evaluate the parameters of biocrust recovery.

Table 1. Experimental inoculation (A) and irrigation (B) treatments, biocrust temporal development (C) and experimental design (D)

A. Inoculants and control (soil)				
ID	Type	Source	Image	
LCdis	Biocrust dominated by cyanobacteria and some isolated lichens	Disturbed site with heavy livestock grazing		
LCcon	Cyanobacteria-dominated biocrust	Conserved site inside a livestock enclosure		
BCcon	Biocrust dominated by cyanobacteria and lichens	Conserved site inside a livestock enclosure		
Soil	Soil with 0-25% biocrust	Disturbed site with heavy livestock grazing		
B. Irrigation				
Irrigación	Monthly precipitation (mm/m²)	Weekly precipitation (mm/ m²)	Weekly irrigation per soil core (mL/cm²)	Core irrigation by pulse (mL/cm² •day)
Dry year (1992)	9.17	2.29	8.82	4.41
Wet year (2016)	65.76	16.44	63.27	31.63
Total	74.93	18.73	72.09	36.04
C. Time				
Temporal group	Description			
Time 0	Beginning of the experiment, soil samples before inoculation, baseline information.			
Time1	Soil microcosm harvest and soil analysis 3 months after inoculation			
Time 2	Soil microcosm harvest and soil analysis 6 months after inoculation			

D. Summary experimental design.

Inocula type	Irrigation	Time of analysis	Replicates	<i>N</i>
Bare Soil	NA	After inoculation	6	6
Soil without inocula (control)	Max (~5 ml)	3 and 6 months	6	24
	Min (~32 ml)			
LCdis	Max (~5 ml)	3 and 6 months	6	24
	Min (~32 ml)			
LCcon	Max (~5 ml)	3 and 6 months	6	24
	Min (~32 ml)			
BCcon	Max (~5 ml)	3 and 6 months	6	24
	Min (~32 ml)			
				102

1.5.4 Analysis of biocrust development

To determine the effect of biocrust inoculation on biocrust recovery, we applied different monitoring parameters. To evaluate biocrust recovery at the macro scale, we measured the biocrust cover, the soil aggregate stability, the roughness and soil moisture. To evaluate the biocrust recovery process at the micro-scale, we used biological and physicochemical parameters (Mallen-Cooper *et al.*, 2020) as the quantification of chlorophyll a, exopolysaccharides (EPS), physicochemical soil properties such as micronutrients concentration (Fe, Mn, Zn and Cu); exchangeable bases (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, and K⁺); electrical conductivity (dS), pH, C and N, 16S rRNA gene sequencing and alpha diversity of microbial community. During the analysis corresponding to microscale, we applied destructive sampling of the whole microcosm.

Prior to extracting the whole soil of each PVC tube (microcosm), the 0.5 cm of biocrust (Young *et al.*, 2019), was carefully removed and stored in vials and subsequently fragmented with mortars inside a laminar flow hood under aseptic conditions. We homogenized and took 50% of a 2 ml vial for each sample and stored them at -80°C for further molecular analysis. The rest of the homogeneous biocrust was stored at -5°C for the quantification of chlorophyll a and EPS. To analyze the physicochemical properties of the soil, we considered the first 3 cm of soil from the microcosm and stored it in plastic bags at -5°C for further analysis. We quantified the content of EPS and chlorophyll a for the biocrust

inocula type and uninoculated soil after inoculation to establish a baseline information and to know the initial state of the biocrust before the biocrust inoculation experiment.

Biocrust chlorophyll a content

Chlorophyll a concentration of each biocrust sample is an essential measure for biocrust development with focus on photosynthetic organisms, as well as a proxy for biomass production. Chlorophyll a was extracted from 1 gr of dried at 80°C for 24 hrs, previously fragmented and homogenized using 5 mL of ethanol as solvent, the mixture was first incubated at 80°C for 5 min and then incubated at 4°C for 8 h. Subsequently, samples were centrifuged at 3500×g for 15 min and the supernatant was recovered. Chlorophyll a content was determined by measuring the absorbance (A) at 665 nm. Each value was corrected by the difference with the absorbance at 750 nm to account the residual scattering of the solution (Mugnai *et al.*, 2018). Chlorophyll a concentration was calculated by applying the formula reported by Ritchie, (2006) for cyanobacteria:

$$Ch\ a\ \left(\frac{\mu g}{g}\right) = \frac{(11.9035 \times A\ (665 - 750)) \times V}{(g\ biocrust \times L)}$$

Where V is the volume of the extract and L is the optical path length.

Biocrust exopolysaccharides (EPS) content

EPS production tends to improve soil stability and moisture content in the topsoil, increasing the biological activity of the biocrust and facilitating the recovery process. The exopolysaccharides in the biocrust have two proportions: one less condensed and with higher water solubility, produced by cyanobacteria (loosely bound-EPS to soil particles, "LB-EPS"); and one with higher level of gelation and adherence to soil particles, produced by other microorganisms (tightly bound-EPS, "TB-EPS"). To determine the two kinds of EPS we performed the protocol reported by Chamizo *et al.*, (2019) and Mugnai *et al.*, (2018).

Extraction of LB-EPS

We added one ml of distilled water for each 50 mg of subsample of biocrust homogenized previously dried at 80°C for 24 hrs, sieved (2mm) and incubated at room temperature for 20 minutes. Subsequently, the mixture was centrifuged at 3500 xg for 30 min, then the supernatant was collected and used for EPS quantification.

Extraction of TB-EPS

The pellets obtained from the extraction of LB-EPS were treated with 5 mL of 0.1M EDTA Na₂ solution, then incubated for 16 hr at room temperature and centrifuged at 3500 xg for 30 min, the supernatant was collected and used for TB-EPS quantification.

Quantification of EPS

We quantified the EPS as suggested by Albalasmeh *et al.*, (2013) and López-Legarda *et al.*, (2017): 3 mL of concentrated H₂SO₄ with 1 mL of EPS solution was extracted in glass vials with lids, vortexed for 30s and cooled on ice for 2 minutes. Subsequently the absorbance was read at 315 nm in the UV-Vis spectrophotometer. In addition, we used the stock solutions of Arabinose and Glucose at 0.1 g/L to prepare the standard curve. The curve included the following concentrations: 10 mg/L, 20 mg/L, 30 mg/L, 40 mg/L, and 50 mg/L.

Determination of biocrust cover

We distinguished between four biocrust categories for measuring the development biocrust cover at before inoculation (time zero), one, three and six months after inoculation. For each soil microcosm we obtained 25 readings equivalent to 100% of cover (Table 2). The type and frequency of biocrust were determined using the point-intercept method with the following equation:

$$C = \frac{r}{T} \times 100$$

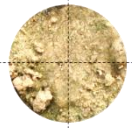
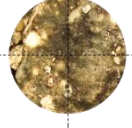
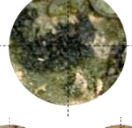
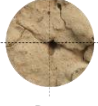
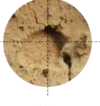
Where

C: biocrust cover (%)

r: total number of records for each biocrust category

T: total number of records taken per quadrat (0.5 x 0.5 cm)

Table 2. Description of biocrust category

Category	Description	Image
% Light crust	Green cyanobacteria and filaments observed in wet soils.	
% Dark crust	Cyanobacteria and observed filaments with brownish-black coloration macroscopically visible in wet soils.	
% Lichen	Visible thallus structure.	
% Bare soil	Disintegrated soil mineral particles, in wet or dry soils.	 

Identification of lichen species

During the point-intercept measurements, we counted the number of lichen individuals. We used taxonomic keys to identify the most dominant species in the biocrust recovery process (Brodo, 2016; Nash, 2002; Rosentreter *et al.*, 2007). Before destructive sampling and processing biocrust samples for micro-scale analysis, we extracted small samples of lichen thalli for microscopic determination; results were validated in the online database <https://lichenportal.org/>

Soil moisture measurements

We started determining soil water content at the sixth month after inoculation registering the weight of each soil microcosm (experimental units) with an analytical balance in the greenhouse after the application of two irrigation pulses during the week. This measurement was repeated daily for 25 days at the same hour. In the following days, their weight (without irrigation) was registered, and its percentage was calculated with respect to the weight of the microcosm after the application of irrigation.

$$\% \text{ Water loss} = \frac{(\text{Weight with irrigation})(100)}{\text{Weight without irrigation}}$$

Soil aggregate stability

In each microcosm we collected three random samples of soil with recovered biocrust (2-4 mm) with a spatula. Soil aggregate stability was measured on a scale of 1 to 6, and according to visual observations of soil disintegration during the first 5 min of immersion in distilled water (Herrick *et al.*, 2001). We represent the total stability of each microcosm by averaging the aggregate stability of the three samples collected.

Roughness evaluation

The microtopography of biocrust development was measured for each soil microcosm with the chain method (Saleh, 1993). This method is based on placing a fine chain of known length (10 cm) in linear distance on top of the biocrust to calculate the roughness coefficient.

$$R = \left(\frac{1 - L_2}{L_1} \right) \times 100$$

Where, R is roughness coefficient; L_1 , length of the distance between the start and end point of the chain on the biocrust (cm); L_2 , length of the chain in horizontal distance (cm) (in our case 10 cm).

Determination of physicochemical soil properties

The soil samples collected at times zero ($N=6$), and 3 and 6 months ($N=98$) after the initiation of the experiment, were oven-dried at 60°C for 24° hrs, homogenized and sieved (2mm). Electric conductivity and pH were determined with the electrometric method with deionized water (1:2 ratio). The soil was classified according to the pH obtained and conductivity based on the official Mexican standard NOM-021-RECNAT-2000. Total carbon and nitrogen were determined with Schubert & Nielsen method in a combustion elemental analyzer COSTECH (ECS4010) (Schubert & Nielsen, 2000). The determination of micronutrients iron (Fe), magnesium (Mn), zinc (Zn), and copper (Cu); and of macronutrients, i.e. exchangeable cations calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), and potassium (K^+), were realized with diethylene triamine penta-acetic acid and ammonium acetate, respectively (Lindsay & Norvell, 1978). The quantification of these elements was performed with inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-OES) in the Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental (LANBAMA-IPICYT).

DNA extraction, 16S rRNA gene sequencing, and sequence analysis

The DNA extraction of biocrust recovery samples in each biocrust microcosm was performed using DNeasy ® PowerSoil Kit from QIAGEN following the manufacturer's protocol. DNA quality was evaluated by electrophoresis in 1% (w/v) agarose gel, and its concentration was quantified spectroscopically using a NanoDrop 2000. The 16S rRNA gene sequencing process was performed by Novogen Corporation In, on the Illumina NovaSeq 6000 platform using the primer set 341F/806R (341 F: 5'-CCTATYGGGRBGCASCAG-3', 806R: 5'-GGACTACNNGGGTATCTAAT-3'), which targets the V3-V4 region. The obtained sequences were aligned with the database SILVA 16S rRNA gene (V. 132).

Abundance, alpha-diversity and richness of biocrust microbial communities.

We performed Illumina sequencing of the 16S rRNA gene from a total of 102 samples of each treatment (Table 1). We recovered an average of 55 931 reads after filtering for quality assurance. They were grouped by ACVs, and the sampling effort was analyzed by Rarefaction analysis to compare alpha diversity (richness, Chao1, Shannon, Simpson) between different treatments.

1.5.5 Statistical analysis

Data analysis was performed using Rstudio software (V4.1.1). Three-way Analysis of Variance (ANOVA) without repeated measures, due the monitoring was carried out at different time periods, with inocula, irrigation and time as factors.

We performed statistical comparisons with the time factor considering only two levels (three and six months after inocula, N=96) for the quantification of chlorophyll a, EPS, roughness and aggregate stability. However, we included the baseline (before inocula, N=6) in the graphs, for a better understanding of the biocrust recovery process. The Kolmogorov-Smirnov test of the nortest package (V. 1.0-4) was used to evaluate the homoscedasticity, normality of data and residuals, accompanied by QQ-Plot. We applied the square root-transformation for the LB-EPS fraction to improve normality. Tukey's HSD was applied for *post-hoc* mean comparisons. We analyze the effect of biocrust inocula, irrigation conditions and recovery of time on the soil aggregate stability by non-parametric Analysis of Variance (ANOVA) and compared to Kruskal-Wallis test to evaluate the statistical confidence of the method, since they did not meet the assumptions of normality and homoscedasticity. To

analyze treatment effects on soil physicochemical properties we applied principal component analysis (PCA) with the packages FactoMineR (V. 2.4) and Factoextra (V. 1.0.7).

Our measurements for the determination of the recovered biocrust cover, did not show a normal distribution, even after the transformation; however, to know the effect of irrigation, type of inocula and time in the determination of biocrust cover, before inoculation, one, three and six months after inoculation, we apply the Linear Mixed Models to analyzed the decrease of bare soil, and lichen development, using the 'lm' function of the Rstats package (V.4 .1.1). For light crust and dark crust cover development, we applied the generalized linear mixed models with t-family distribution using the glmmTMB package (V. 1.1.7). Model fit was calculated by the restricted maximum likelihood method (AIC) and residuals were evaluated using the DHARMA (V. 0.4.6) package. We analyzed soil moisture in soil microcosms six months after inoculation with the different inocula types of biocrusts at different water pulses. The results were analyzed using generalized linear models, with t-family distribution, using the time of measurement as the random intercept.

1.6 Results

1.6.1 Inoculants and soil characterization

The inoculants of biocrust and the collected soil with low biocrust cover were analyzed to establish the baseline conditions of the experiment (Mugnai *et al.*, 2018). The disturbed soil sample forming the microcosms had less than 15% Chlorophyll a concentration compared to the biocrust inoculants (Fig. 3-B). The LB-EPS concentration did not present significant differences when comparing biocrust inoculants. However, the TB-EPS concentration was significantly higher in the BCcon inocula than in the light biocrust inoculants (LCcon and LCdis) and the soil without inocula (Figure 3-A). The LB-EPS did not present significant differences between types of biocrust and the soil (Fig. 3-A).

Chlorophyll a concentration between inocula and soil were significantly different. The collected soil presented lower chlorophyll a concentration (1.73 mg/g dry crust) than the average of the other inoculants (12.39 mg/g dry crust), due to the low biocrust cover and higher percentage of bare soil (75 – 100%) (Fig. 3-B).

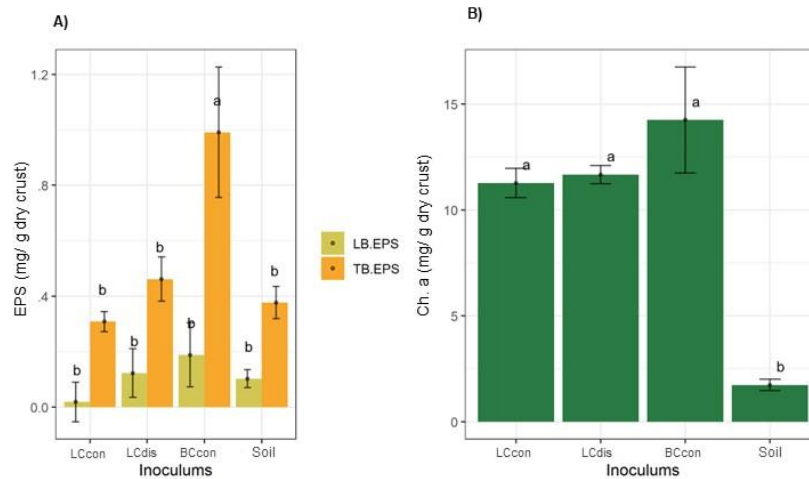


Fig. 3. Exopolysaccharide content (Loosely bound, LB-EPS; Tightly bound, TB-EPS) (A) and Chlorophyll a concentration (B) before inoculation. Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis); soil (microcosm of disturbed soil without inocula of biocrust). Different letters above bars indicate significant difference (One-Way ANOVA, Tukey mean comparison test $p < 0.05$).

1.6.2 Development of biocrust

Chlorophyll a content

Chlorophyll a concentration increased significantly about 15% between three and six months after inoculation only under the maximum irrigation condition (irrigation*time, $F_{1, 80} = 5.111$, $p=0.026$; Table 3; Figure 4-A). In the treatments inoculated with LCdis, the production of chlorophyll a doubling after six months than during the first three months of inoculation (Figure 4-B), but saw no change in the other inocula.

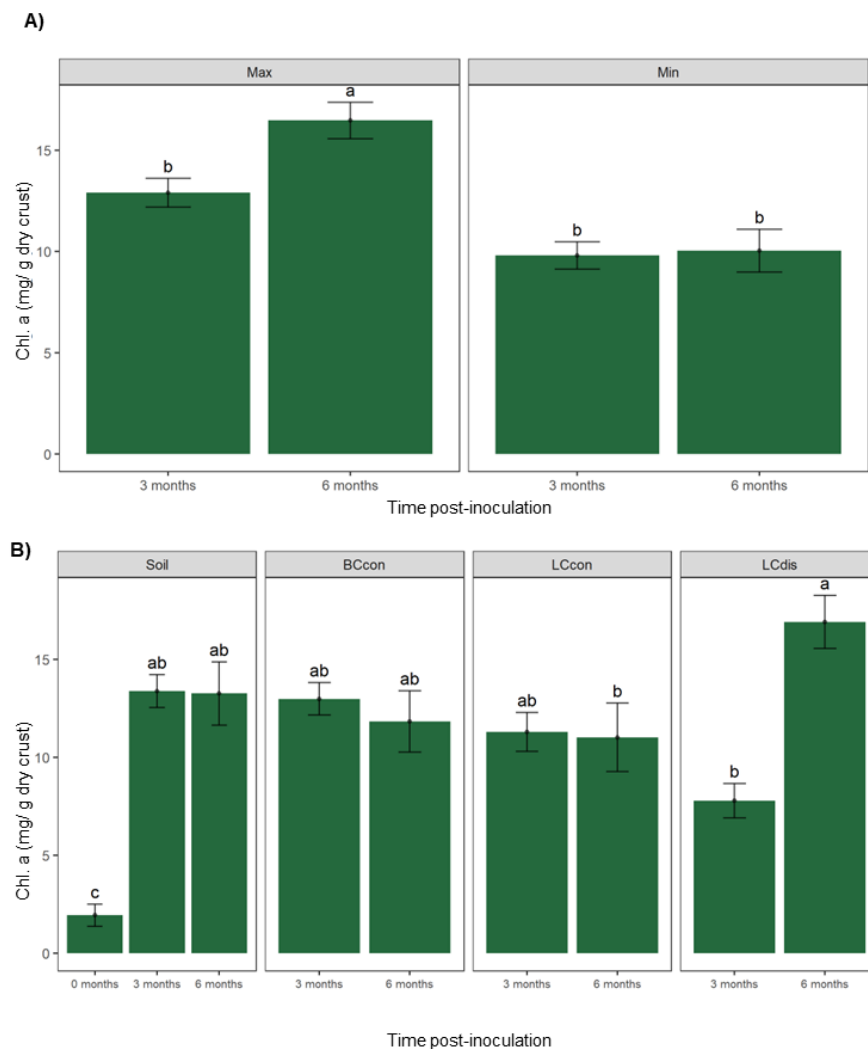


Fig. 4. Chlorophyll a production. A. Irrigation by time interaction ($F_{1, 80} = 5.111$, $p=0.0265$); B. Inocula by time interaction ($F_{3, 80} = 10.835$, $p < 0.001$). Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis); soil (microcosm of disturbed soil without inocula of biocrust). Different letters above bars indicate significant difference (Three-way ANOVA, Tukey mean comparison test, $p < 0.05$).

Exopolysaccharides production

The production of LB-EPS and TB-EPS increased by 10% significantly six months after inoculation than at three months of treatment application (Fig. 5-A; Table 3). No effects of inocula type and water treatment were reported during the experimental period between 3 and 6 months of biocrust recovery.

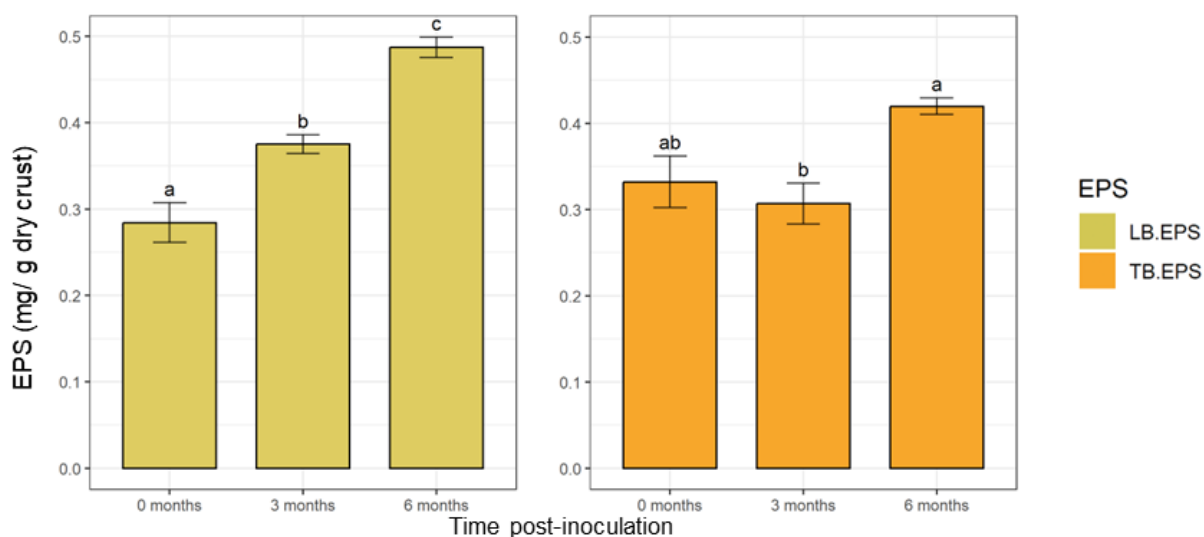


Fig. 5. EPS production after inoculation. *EPS (LB-EPS, TB-EPS) concentration at before inoculation (zero months) 3 and 6 months after inoculation. Different letters above bars indicate significant difference (Three-way ANOVA, Tukey $p < 0.05$; LB-EPS data with sqrt-transformation).*

Table 3. ANOVA Table for Chlorophyll a and EPS content ($p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$).**

		<i>Df</i>	<i>Sum Sq</i>	<i>Mean Sq</i>	<i>F value</i>	<i>Pr(>F)</i>	
<i>Chlorophyll a</i>							
<i>Inoculants before inoculation</i> ¹	Inocula	3	271.36	90.45	17.23	0.00075	***
	Residuals	8	41.99	5.25			
<i>Treatments after Inoculation</i> ²	Inocula	3	56.5	18.8	1.45	0.2344	
	Irrigation	1	544.1	544.1	41.932	7.08E-09	***
	Time	1	86.1	86.1	6.636	0.0118	*
	Inocula*Irrigation	3	51.9	17.3	1.333	0.2694	
	Inocula*Time	3	421.7	140.6	10.835	4.76E-06	***
	Irrigation*Time	1	66.3	66.3	5.111	0.0265	*
	Inocula*Irrigation*Time	3	26.8	8.9	0.689	0.5613	
	Residuals	80	1038	13			
<i>LB-EPS</i>							
<i>Inoculants before inoculation</i> ¹	Inocula	3	0.04399	0.01466	0.725	0.565	
	Residuals	8	0.16185	0.02023			
<i>Treatments after Inoculation</i> ²	Inocula	3	0.0112	0.00372	0.549	0.65	
	Irrigation	1	0.0054	0.00544	0.803	0.373	
	Time	1	0.3021	0.30208	44.537	2.99e-09	***
	Inocula*Irrigation	3	0.0106	0.00354	0.522	0.668	
	Inocula*Time	3	0.0148	0.00494	0.729	0.538	
	Irrigation*Time	1	0.0004	0.00036	0.053	0.819	
	Inocula*Irrigation*Time	3	0.0036	0.00121	0.179	0.911	
	Residuals	80	0.5426	0.00678			
<i>TB-EPS</i>							
<i>Inoculants before inoculation</i> ¹	Inocula	3	0.8689	0.28965	5.809	0.0208	*
	Residuals	8	0.3989	0.04986			
<i>Treatments after Inoculation</i> ²	Inocula	3	0.0147	0.00489	0.302	0.824	
	Irrigation	1	0.02	0.02002	1.235	0.27	
	Time	1	0.3063	0.30634	18.889	4.04e-05	***
	Inocula*Irrigation	3	0.0053	0.00176	0.109	0.955	
	Inocula*Time	3	0.0718	0.02395	1.477	0.227	
	Irrigation*Time	1	0.0029	0.00291	0.18	0.673	
	Inocula*Irrigation*Time	3	0.051	0.01699	1.048	0.376	
	Residuals	80	1.2974	0.01622			

¹ Baseline information prior to inocula inoculation

² Treatments after inoculation (three and six months after inoculation).

1.6.3 Soil Aggregate Stability and Soil Roughness

The soil aggregate stability soil increased significantly with the irrigation conditions and over time after inoculation ($F_{1, 80} = 27.099$, $p < 0.001$). The recovery of biocrust develops a higher soil aggregation under maximum irrigation conditions than under minimum irrigation treatment (Fig. 6-A) and significantly increased with time (Fig. 6-A, Table 4). Soil aggregate stability increased significantly throughout the experiment, reaching close to maximum stability after 6 months (Fig. 6-B, Table 4). The inoculation treatments did not influence soil stability (Table 4).

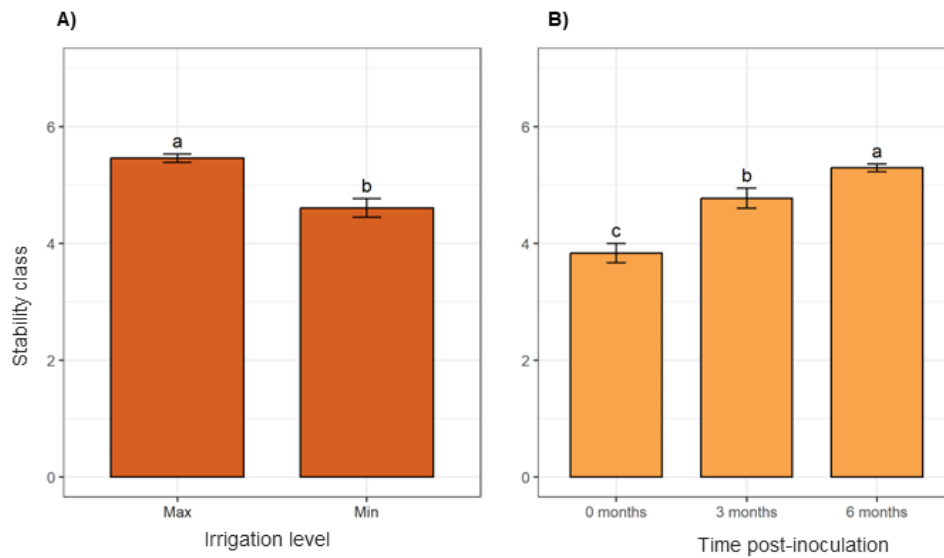


Fig. 6. Soil aggregate stability. A. Response to water treatments: minimum (min) and maximum (max) irrigation ($F_{1, 80} = 27.099$, $p < 0.001$). B. Response to time before inoculation (0 months) and after inoculation (3 and 6 months; $F_{1, 80} = 4.791$, $p = 0.0315$). Different letters above bars indicate significant difference.

The soil roughness formed more pronouncedly between 3 and 6 months after inoculation (Fig. 7-A) ($F_{1, 80} = 12.836$, $p < 0.001$), and less roughness development was observed in soil microcosms without inocula, compared to those inoculated with biocrust (Fig. 7-B; Table 4).

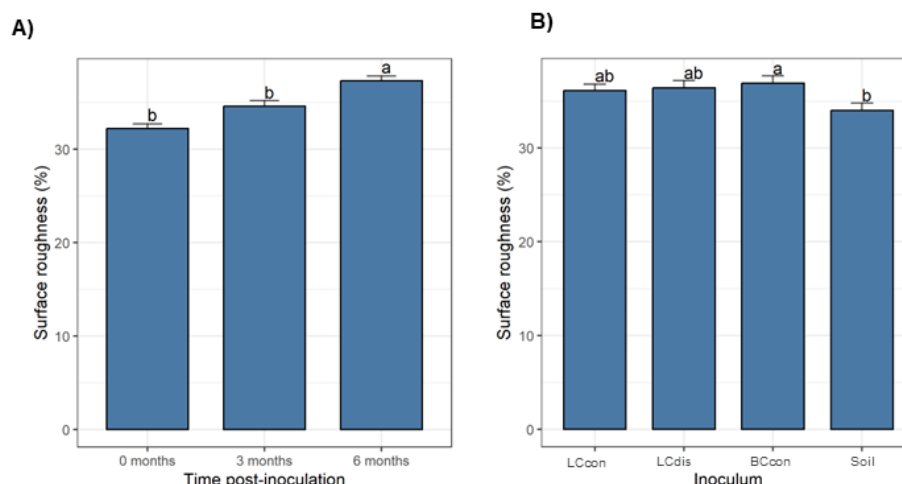


Fig. 7. Soil surface roughness. A. Before inoculation (0 months) and after inoculation (3 and 6 months $F_{1, 80} = 12.836$, $p < 0.001$); B. Considering inoculants treatments ($F_{3, 80} = 1.986$, $p = 0.0179$). Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis); soil (microcosm of disturbed soil without inocula of biocrust). Different letters above bares indicate significant difference (Three-Way ANOVA, irrigation effect in the time, $p < 0.05$; Tukey 0.05).

Table 4. Soil roughness and soil aggregate stability of the biocrust inoculation experiment under different irrigation conditions. Values depict mean and standard error ($n=96$). Three-way ANOVA was performed for inocula, irrigation, and time of inoculation variables (** $p < 0.001$, * $p < 0.01$, * $p < 0.05$).

Soil roughness						
		Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Treatments after inoculation	Inocula	3	81.0	26.98	1.986	0.017967
	Irrigation	1	26.9	26.86	1.977	0.163548
	Time	1	174.4	174.37	12.836	0.000582 ***
	Inocula*Irrigation	3	32.6	10.86	0.799	0.497953
	Inocula*Time	3	27.9	9.28	0.683	0.564760
	Irrigation*Time	1	44.1	44.06	3.244	0.075465
	Inocula*Irrigation*Time	3	10.9	3.62	0.267	0.849215
	Residuals	80	1086.8	13.58		
Soil aggregate stability						
		Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Treatments after inoculation	Inocula	3	375	125	0.254	0.8585
	Irrigation	1	13348	13348	27.099	1.46e-06 ***
	Time	1	2360	2360	4.791	0.0315 *
	Inocula*Irrigation	3	286	95	0.194	0.9005
	Inocula*Time	3	303	101	0.205	0.8926
	Irrigation*Time	1	2360	2360	4.791	0.0315 *
	Inocula*Irrigation*Time	3	303	101	0.205	0.8926
	Residuals	80	39406	493		

1.6.4 Biocrust cover developed

The cover of biocrust type (bare soil, light biocrust, dark biocrust and lichen) on the surface of the soil microcosms changed differently over time depending on inocula of biocrust type and irrigation treatments (Table 5 A-B; Fig. 8).

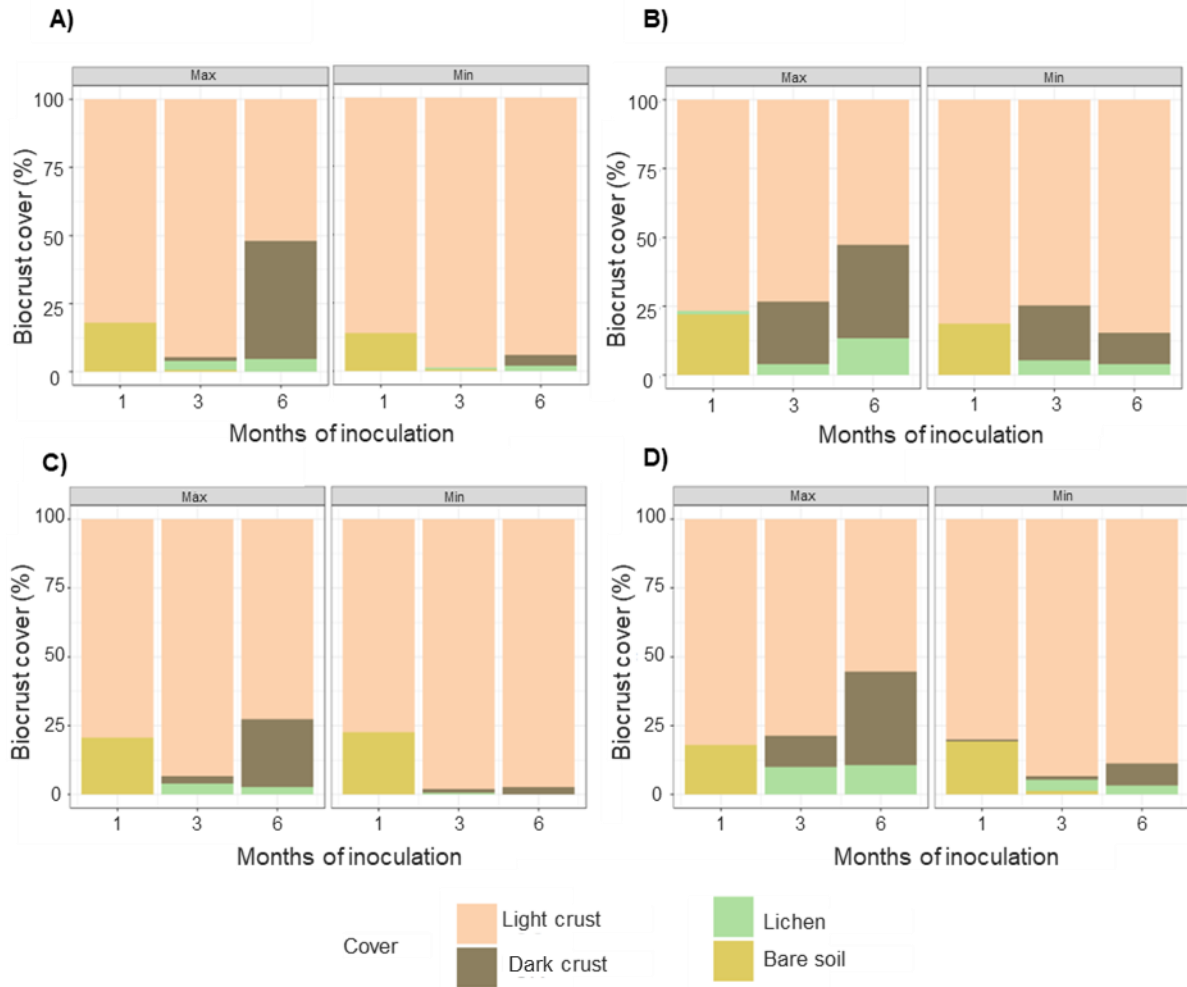


Fig. 8. Percentage of biocrust cover developed in the biocrust inocula treatments, irrigation conditions and time after inoculation. A. Soil microcosms without inocula (only disturbed soil exposed to minimum and maximum irrigation conditions). B. Treatments inoculated with Light crust from disturbed site (LCdis); C. Treatments inoculated with Light crust from conserved site (LCcon) and, D. Treatments inoculated with dark crust from conserved site (BCcon).

Table 5. Statistical analyses of cover types. *P*-Value are significantly different when *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

A. Permutational analysis of variance (PERMANOVA) of the cover composition

	<i>Df</i>	<i>Sum Sq</i>	<i>R2</i>	<i>F value</i>	<i>Pr(>F)</i>
Inocula	3	0	0	0	1
Irrigation	1	0	0	0	1
Time	2	0	0	0	1
Cover	3	607300	2209	1	0.001 ***
Inocula*Irrigation	3	0	0	0	1
Inocula*Time	6	0	0	0	1
Irrigation*Time	2	0	0	0	1
Inocula*Cover	9	5469	7	0	0.001 ***
Irrigation*Cover	3	10683	39	0	0.001***
Time*Cover	6	26510	48	0	0.001***
Inocula*Irrigation*Time	6	0	0	0	1
Inocula*Irrigation*Cover	9	580	1	0	0.711
Inocula*Time*Cover	18	5399	3	0	0.001 ***
Irrigation*Time*Cover	6	12572	23	0	0.001 ***
Inocula*Irrigation*Time*Cover	18	1328	1	0	0.702
Residuals	480	43984		0	
Total	575	713824		1	

B. ANOVA of Generalized Lineal Models (GLM) and Linear Regression Models (LM, for each type of cover

Cover of type			
Bare soil (GLM).			
	<i>df</i>	χ^2	<i>P</i>
Inocula	3	3.6058	0.462
Time	3	78.7141	3.261e-16 ***
Irrigation	2	0.1617	0.9223
Inocula*Time	6	0.2088	0.9998
Inocula*Irrigation	3	1.2117	0.7502
Time*Irrigation	2	0.0795	0.961
Inocula*Time*Irrigation	6	0	1
Light Crust (GLM).			
	<i>df</i>	χ^2	<i>P</i>
Inocula	3	74.418	4.83e-16 ***
Time	2	110.26	< 2.2e-16 ***
Irrigation	1	207.273	< 2.2e-16 ***
Inocula*Time	6	18.241	0.005658 **
Inocula*Irrigation	3	14.876	0.001926 **
Time*Irrigation	2	142.534	< 2.2e-16 ***
Inocula*Time*Irrigation	6	19.599	0.003264 **

Dark Crust (LM).				
	<i>df</i>	<i>Sum Sq</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Inocula	3	1686.6	4.1452	0.007801 **
Time	2	9974.2	36.7721	3.500e-13 ***
Irrigation	1	3885.4	28.649	4.230e-07 ***
Inocula*Time	6	2287.1	2.8106	0.013551 *
Inocula*Irrigation	3	203	0.4989	0.683721
Time*Irrigation	2	5366.2	19.7837	3.752e-08 ***
Inocula*Time*Irrigation	6	541.3	0.6652	0.677835
Residuals	120	16274.7		
Lichen (LM).				
	<i>df</i>	<i>Sum Sq</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Inocula	3	366.56	8.8256	2.471e-05 ***
Time	2	640.67	23.138	3.170e-09 ***
Irrigation	1	289	20.8748	1.198e-05 ***
Inocula*Time	6	235.78	2.8384	0.012787 *
Inocula*Irrigation	3	40.33	0.9711	0.408826
Time*Irrigation	2	160.67	5.8026	0.003931 **
Inocula*Time*Irrigation	6	148.67	1.7897	0.106789
Residuals	120	1661.33		

The values of parameters of each lineal model are in Appendix A1.9.2

1. Bare soil

Bare soil decreased significantly in all treatments over time. The irrigation and inocula type didn't show significant effects independently or in interaction after inoculation, when two irrigation pulses (maximum and minimum) were established (Fig. 9).

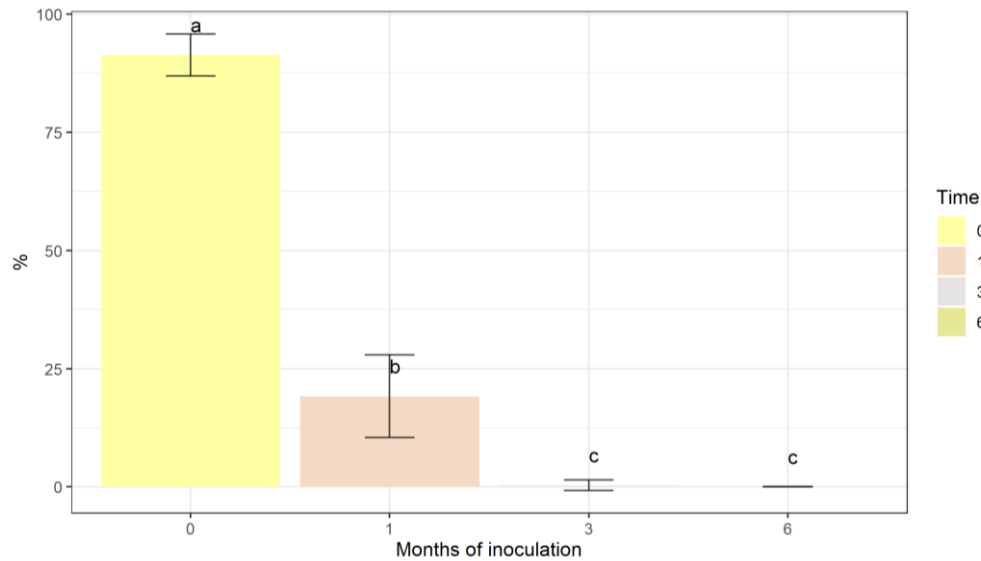


Fig. 9. Decreased bare soil over time. Different letters indicate difference between groups, PERMANOVA-Pairwise; Table A 1).

2. Light Crust

We observed that while the bare soil decreased, the light crust coverage increased one month after inoculation. Factors such as time, irrigation condition and inocula type, generated significant effects on the development of light crust coverage (Table 5).

Each biocrust inocula produced different percentages of light crust coverage, even those treatments without inocula, such as the control (soil without inocula), only required irrigation for light crust develop (Fig. 10-A, D). Light crust coverage increased to 82.5% under minimal irrigation conditions compared to maximum irrigation conditions (74.5%) (Fig. 10-B, D). However, light crust coverage decreased six months after inoculation (77%) (Fig. 10-C), especially in treatments under maximum irrigation (63.5%) (Fig. 10-F).

During the first month of inoculation, we did not observe significant differences between inocula types. However, three months later, the treatments inoculated with light crust from conserved site (LCcon) and soil without inocula recovered higher percentage of coverage in contrast to other inoculants (Fig. 10-E).

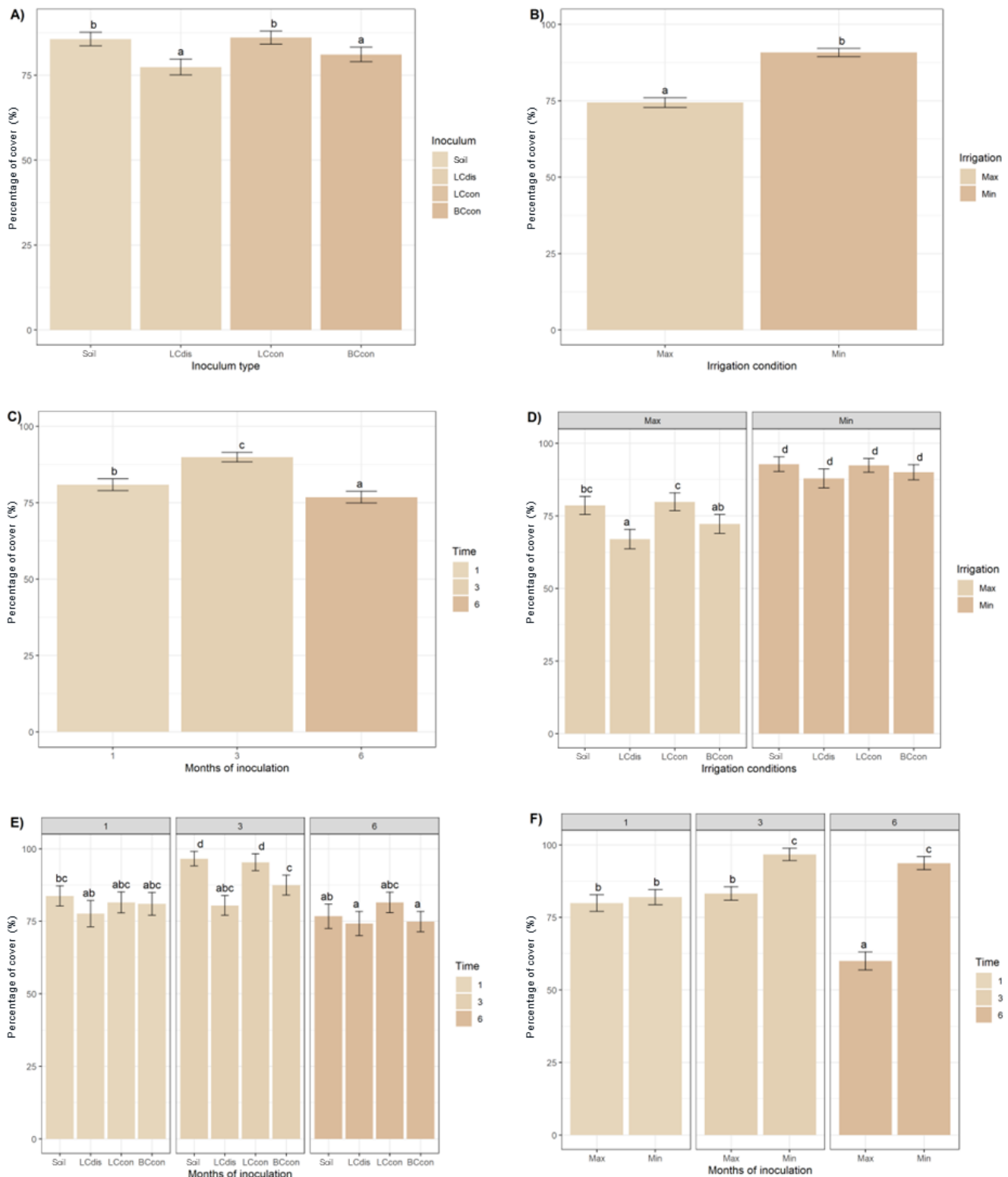


Fig. 10. Recovery of light crust coverage. Comparison by: Inocula (A); Irrigation (B); Time (C); Inocula*Irrigation (D); Inocula*Time (E); and Irrigation*Time (F). Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis), with minimum (Min) and maximum (Max) irrigation conditions. Different letters indicate significant difference Generalized Linear Models (GLM, t-family, R² marginal: 0.994; Table A 2).

3. Dark crust

We observed that the inoculation of biocrust can regenerate a dark biocrust coverage, which requires more water irrigation and time for its development (Table 5, Fig. 11-B, C). The inoculation with light crust from the disturbed site (LCdis) promoted higher dark crust coverage (14.5%) compared to inoculation with light crust from the conserved site (LCcon; 15.6%) (Fig. 11-A).

During the first month after inoculation, the treatments did not show significant differences in the development of dark biocrust. The treatments inoculated with LCdis increased significantly dark biocrust coverage to 24% in three months, compared to the rest of the inoculants. During the six months after inoculation, all inoculants increased dark biocrust, even the control (soil without inocula) (Fig. 11-D).

The maximum irrigation condition produced 14% while the minimum irrigation condition produced 4% of dark crust coverage (Fig. 11-B). Furthermore, at the maximum irrigation produced significantly 34.5% coverage of dark crust at six months, and 8.5% at three months. While the minimum irrigation conditions produced 7.3% at six months and 6% at three months (Fig. 11-E).

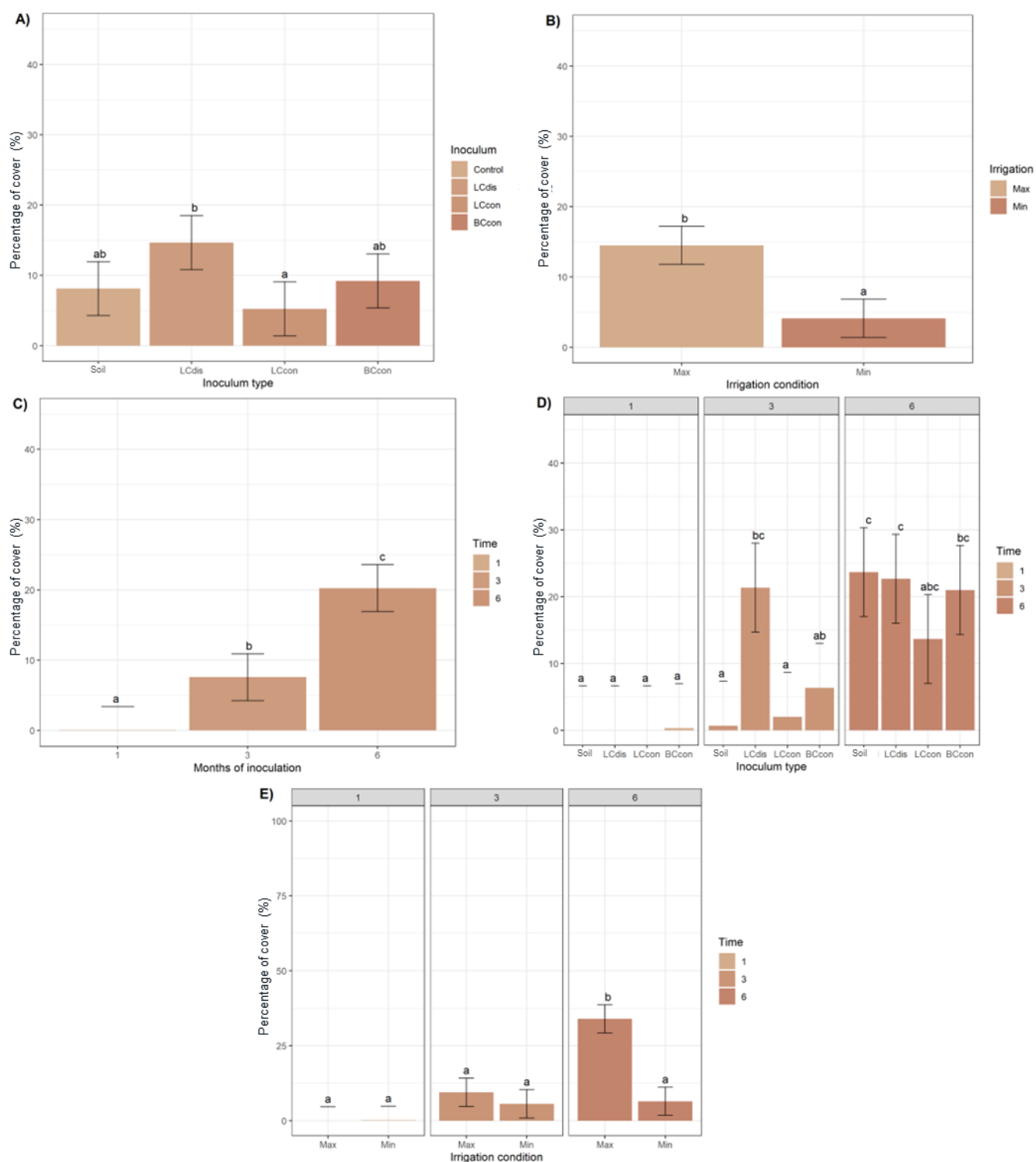


Fig. 11. Recovery of dark crust coverage. Comparison by Inocula (A), Irrigation (B), Time (C), Inocula*Time (D), Irrigation*Time (E). Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis), with minimum (Min) and maximum (Max) irrigation conditions. Different letters indicate significant differences, Linear Regression Model (LM R^2/R^2 adjusted 0.595 / 0.518; Table A 3).

4. Lichen

Lichen development was observed in all treatments three months after inoculation; Our analysis showed that irrigation, inocula and time have significant effects on lichen development ($p < 0.001$; Table 5). Maximum irrigation promoted higher coverage of lichens than minimum irrigation (Fig. 12-B, E).

The treatments inoculated with LCdis and BCcon, produced higher lichen coverage (4.2%) significantly compared to the soil without inocula (2%) and LCcon inocula (1.2%) (Fig. 12-A).

We observed that lichen coverage increased significantly at three months and persists at six months after inoculation (Fig. 12-C).

Lichen coverage began to develop in the treatments inoculated with BCcon, one month after inoculation. At three months, the treatments inoculated with LCdis significantly increased 20% of their coverage with respect to the soil without inocula and LCcon. Treatments with y BCcon did not show significant differences. Six months after inoculation, lichen coverage increased in all inoculated treatments without significant differences, with an average coverage of 5.2% (Fig. 12-C, D).

The lichen species increased at three and six months after inoculation, mainly *Placidium lacinulatum* (Ach.) Breuss with 42 and 63 individuals, respectively; *Placidium squamulosum* (Ach.) with 32 and 50 individuals, respectively; *Collema coccophorum* (Tuck) with 17 and 29 individuals, respectively and *Collema tenax* with 6 and 9 individuals respectively. Other species as *Peltula patellata* and *Heppia conchiloba*, were found in only two experimental units (Fig. 12-F).

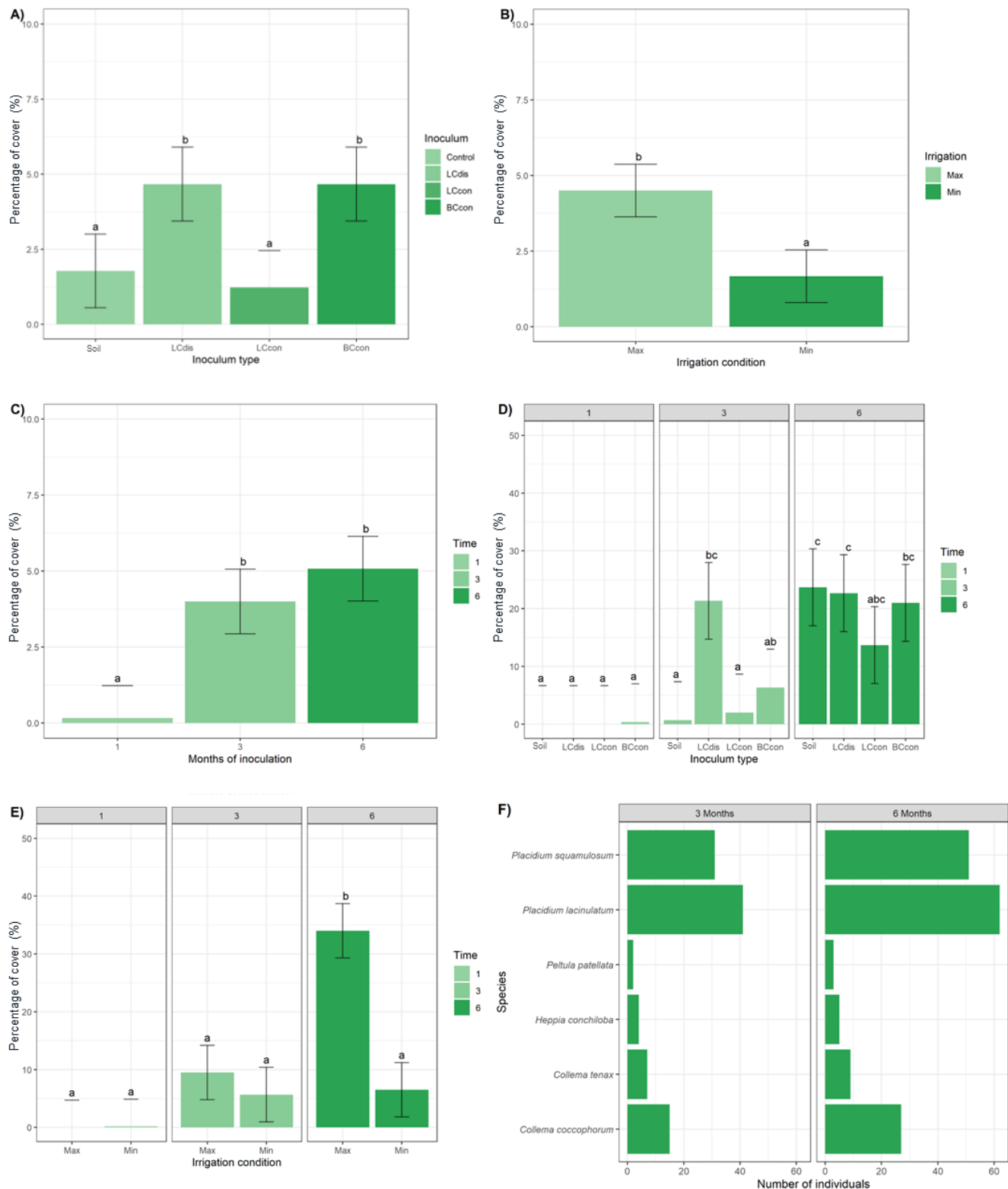


Fig. 12. Recovery of lichen coverage. Comparison by Inocula (A), Irrigation (B), Time (C), Inocula*Time (D), Irrigation*Time (E) and observed lichens species (F). Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis), with minimum (Min) and maximum (Max) irrigation conditions. Different letters indicate significant difference, Lineal Regression Model (LM R^2/R^2 adjusted 0.531 / 0.441; Table A 4).

1.6.4 Physicochemical properties of soil during biocrust development

The pH and electrical conductivity showed significant differences in the inocula, irrigation and time (Table A5). The soil was identified as moderately alkaline (8.3) and saline (7.9 dS) (NOM-021-RECNAT-2000).

The physicochemical properties of the inoculated soil microcosms determined changes in the micronutrients concentration (Fe, Mn, Zn and Cu); exchangeable bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , and K^+); electrical conductivity (dS), pH, C and N (Fig. 13).

The pattern of change in physicochemical properties showed differences with respect to time before and after inoculation, increasing the physicochemical properties concentration. The influence of K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ and electrical conductivity in the inoculated soil microcosm was lower compared to Cu, Zn, Fe, Mn, C and N, which presented a greater contribution in recovery biocrust process (Fig. 13).

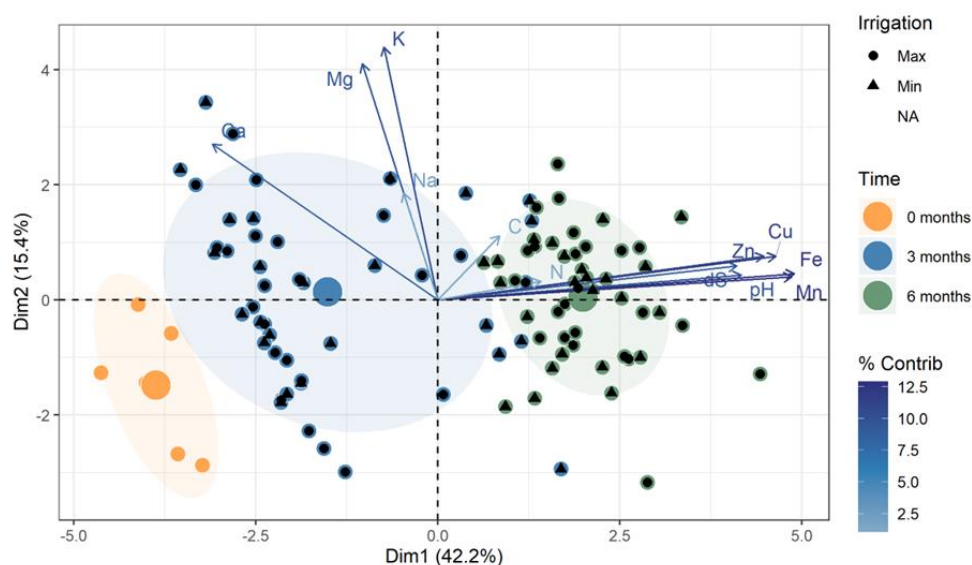


Fig. 13. PCA of soil physicochemical properties considering temporal development and irrigation treatments. *The size of vectors is proportional to the percentage of contribution in the components.*

The PCA revealed that the first two principal components (Dim1 and Dim2) accounted for a significant proportion of the total variance in the data. Specifically, Dim1 explained 42.2% of the variance, Dim2 explained 15.4% together accounting for 57.6% of the total variance (Table 6).

Table 6. Variance Explained by Principal Components

Principal Component	Eigenvalue	Proportion of Variance (%)	Cumulative Variance (%)
Dim.1	5.062	42.186	42.186
Dim.2	1.848	15.407	57.594
Variable	Dim.1	Dim.2	
pH	12.615	0.363	
dS	12.254	0.700	
Ca	6.954	14.568	
K	0.394	38.412	
Mg	0.778	33.420	
Na	0.158	6.834	
Cu	15.660	1.144	
Fe	17.433	0.411	
Mn	17.196	0.323	
Zn	14.576	1.140	
N	1.4547	0.206	
C	0.521	2.473	

The concentration of micronutrients showed changes with inocula, irrigation and time ($p < 0.001$; Table A 5). Treatments inoculated with BCcon showed low concentrations of Cu, Fe and Zn (0.07, 0.27, 0.06 mg/L, respectively) compared to the rest of the inoculants. The concentration of Mg^{2+} was significantly higher in the soil without inocula (2.36 mg/L) than in those treatments with BCcon (1.49 mg/L). However, the concentration of Cu, Fe, Mn and Zn at three months (0.05, 0, 0.56 and 0 mg/L, respectively) increased significantly six months after inoculation (0.1, 0.55, 2.78, and 0.1 mg/L, respectively) (Table 7; A 5).

The soil without inocula and the treatments inoculated with LCdis, obtained significantly higher Ca^{2+} concentration (151.38, 146.88, mg/L respectively) than those inoculated with LCcon (146.85 mg/L). The Mg^{2+} concentration was significantly higher in treatments inoculated with BCcon (10.32 mg/L) and without inocula (10.66 mg/L) than in those inoculated with LCdis and LCcon (10.15 mg/L). The concentration of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , and K^+ at three months after inoculation (145.31, 48.76, 10.17, 1.42, mg/L respectively) increased significantly six months later (151.16, 49.62, 10.47, 1.73, mg/L respectively). The C and N concentration did not show differences under inocula, irrigation and time after inoculation conditions (Table 7; A 5)

Table 7. Physicochemical properties of soil of microcosms inoculated with different biocrust samples. Values depict mean and standard error (n=96). Different letters indicate significant difference between treatments: biocrust inoculants, irrigation condition, and the time of recovery (ANOVA Tukey $p < 0.05$).

A. Means and statistical comparisons for Inocula of biocrust, Irrigation conditions and Inoculation time.

	<i>Inocula</i>				<i>Irrigation</i>		<i>Time</i>	
	<i>Soil without inocula</i>	<i>BCcon</i>	<i>LCdis</i>	<i>LCcon</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>3 months</i>	<i>6 months</i>
pH	8.42±0.16 a	8.4±0.13 ab	8.36±0.15 bc	8.33±0.14 c	8.41±0.16 a	8.35±0.14 b	8.26±0.06 b	8.5±0.11 a
dS (dS/m)	7.9±0.8 a	8.0±0.8 bc	8.3±0.7 ab	8.4±0.8 a	8.4±0.1 a	8.3±0.1 b	8.8±0.6 b	7.5±0.36 a
<i>Exchangeable bases (mg/L)</i>								
Ca²⁺	151.38±5.96 b	147.83±6.79 ab	146.88±5.64 a	146.85±5.98 b	148.77±6.97 a	147.7±5.56 a	145.31±4.33 a	151.16±6.61 b
K⁺	51.09±6.61 a	50.1±5.69 a	48.33±6.15 a	47.24±4.98 a	49.35±5.08 a	49.03±6.82 a	48.76±4.98 a	49.62±6.88 a
Mg²⁺	10.66±0.55 b	10.32±0.84 b	10.15±0.68 ab	10.15±0.43 a	10.34±0.63 a	10.3±0.71 a	10.17±0.66 a	10.47±0.65 b
Na⁺	1.74±2.55 a	1.6±0.71 a	1.53±0.71 a	1.44±0.61 a	1.67±1.85 a	1.49±0.66 a	1.42±0.57 a	1.73±1.87 a
<i>Micronutrients (mg/L)</i>								
Cu	0.1±0.02 b	0.07±0.05 a	0.07±0.04 b	0.06±0.04 b	0.08±0.04 a	0.07±0.04 a	0.05±0.04 b	0.1±0.02 a
Fe	0.51±0.14 b	0.27±0.26 a	0±0 b	0±0 b	0±0 a	0±0 a	0±0 b	0.55±0.12 a
Mn	2.36±0.91 b	1.49±1.54 a	1.46±1.35 b	1.38±1.4 b	1.67±1.24 a	±1.67±1.48 a	0.56±0.85 b	2.78±0.7 a
Zn	0.1±0.03 b	0.06±0.04 a	0±0 b	0±0 b	0±0 a	0±0 b	0±0 b	0.1±0.03 a
C	4.25±1.92 a	4.64±1.91 a	4.41±2.28 a	6.19±7.86 a	4.45±2.3 a	5.3±5.65 a	5.21±2.3 a	4.53±5.66 a
N	1.02±0.6 a	1.02±0.51 a	1.23±0.65 a	1.28±0.82 a	1.13±0.62 a	1.14±0.71 a	1.25±0.64 a	1.02±0.66 a

Three-way ANOVA values was performed for inocula, irrigation, and time of inoculation variables (*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$). The ANOVA table for each physicochemical properties is in Table A 5.

B. Means and statistical comparisons for the interactions between Inocula of biocrust and Irrigation condition.

Inocula	LCcon	LCcon	LCdis	LCdis	BCcon	BCcon	Soil	Soil
Irrigation	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
pH	8.35±0.17 abc	8.32±0.10 c	8.40±0.14 ab	8.32±0.16 bc	8.45±0.16 a	8.34±0.07 bc	8.43±0.15 a	8.42±0.18 ab
dS (dS/m)	8.0±0.9 ab	7.8±0.6 a	8.3±0.9 bc	7.6±0.7 a	8.6±0.8 c	8.0±0.4 ab	8.4±0.9 bc	8.3±0.8 bc
<i>Exchangeable bases (mg/L)</i>								
Ca²⁺	148.80±6.83 ab	144.97±3.44 b	151.64±5.79 a	151.11±6.37 ab	148.21±7.66 ab	147.46±6.11 ab	147.28±4.62 ab	146.42±7.29 ab
K⁺	51.20±6.54 a	49.01±4.72 a	52.42±8.17 a	49.77±4.57 a	46.89±6.14 a	49.76±6.06 a	45.62±4.05 a	48.87±5.45 a
Mg²⁺	10.74±0.48 a	10.57±0.62 a	10.38±0.71 a	10.25±0.99 a	10.21±0.69 a	10.10±0.70 a	10.04±0.44 a	10.26±0.40 a
Na⁺	1.42±0.50 a	1.64±0.88 a	1.55±0.65 a	1.33±0.58 a	1.74±0.84 a	1.46±0.55 a	1.24±0.60 a	2.24±3.56 a
<i>Micronutrients (mg/L)</i>								
Cu	0.06±0.04 c	0.08±0.04 bc	0.07±0.05 bc	0.06±0.04 c	0.09±0.01 ab	0.11±0.03 a	0.07±0.05 bc	0.07±0.05 bc
Fe	0.00±0.00 a	0.35±0.26 a	0.29±0.28 a	0.00±0.00 a	0.46±0.16 a	0.56±0.10 a	0.26±0.26 a	0.27±0.26 a
Mn	1.45±1.52 c	1.46±1.23 c	1.54±1.68 bc	1.44±1.46 c	2.23±1.22 ab	2.48±0.45 a	1.44±1.52 c	1.32±1.34 c
Zn	0.00±0.00 b	0.07±0.05 ab	0.00±0.00 b	0.00±0.00 b	0.10±0.03 a	0.10±0.04 a	0.05±0.03 ab	0.07±0.05 ab
C	4.43±2.07 a	7.94±10.87 a	4.84±2.79 a	3.98±1.63 a	4.23±2.00 a	5.05±1.80 a	4.28±2.51 a	4.22±1.19 a
N	1.25±0.67 a	1.31±0.98 a	1.27±0.70 a	1.19±0.63 a	0.99±0.52 a	1.05±0.52 a	1.03±0.58 a	1.01±0.65 a

C. Means and statistical comparisons for the interactions between Irrigation condition and Time.

Irrigation	Max	Max	Min	Min
Time	3 months	6 months	3 months	6 months
pH	8.28±0.05 b	8.54±0.11 a	8.25±0.07 c	8.46±0.10 a
dS (dS/m)	7.5±0.2 a	9.1±0.6 c	7.4±0.4 a	8.5±0.5 b
<i>Exchangeable bases (mg/L)</i>				
Ca²⁺	152.00±6.79 a	145.54±5.59 b	150.33±6.47 a	145.08±2.64 b
K⁺	50.43±7.85 a	47.64±5.43 a	48.82±5.80 a	49.89±4.32 a
Mg²⁺	10.37±0.65 ab	10.32±0.63 ab	10.57±0.65 a	10.02±0.66 b
Na⁺	1.47±0.70 a	1.50±0.64 a	1.99±2.56 a	1.34±0.50 a
<i>Micronutrients (mg/L)</i>				
Cu	0.04±0.03 b	0.11±0.02 a	0.05±0.04 b	0.10±0.02 a
Fe	0.00±0.00 b	0.53±0.12 a	0.00±0.00 b	0.57±0.13 a
Mn	0.36±0.59 b	2.98±0.75 a	0.76±1.02 b	2.59±0.61 a
Zn	0.00±0.00 c	0.08±0.03 b	0.00±0.00 c	0.11±0.04 a
C	3.54±1.45 a	5.35±2.64 a	5.53±7.83 a	5.07±1.95 a
N	0.93±0.48 a	1.33±0.68 a	1.11±0.80 a	1.17±0.61 a

D. Means and statistical comparisons for the interactions between Inocula of biocrust, Irrigation conditions and Inoculation time.

Inocula																
	LCcon	LCcon	LCcon	LCcon	LCdis	LCdis	LCdis	LCdis	BCcon	BCcon	BCcon	BCcon	Soil	Soil	Soil	Soil
Irrigation																
	Max	Max	Min	Min	Max	Max	Min	Min	Max	Max	Min	Min	Max	Max	Min	Min
Time																
	3 months	6 months	3 months	6 months	3 months	6 months	3 months	6 months	3 months	6 months	3 months	6 months	3 months	6 months	3 months	6 months
pH	8.21±0.04 d	8.48±0.15 ab	8.23±0.03 cd	8.41±0.05 ab	8.30±0.04 bc	8.51±0.12 ab	8.18±0.05 d	8.46±0.08 ab	8.31±0.05 cd	8.60±0.04 a	8.30±0.05 bc	8.39±0.06 ab	8.28±0.01 cd	8.57±0.04 a	8.27±0.09 d	8.57±0.1 0 a
dS (dS/m)	7.3±2.40 a	8.7±0.8 de	7.1±0.2 a	8.4±0.2 cd	7.6±1.7 abc	9.0±0.7 de	7.1±0.2 a	8.2±0.4 bcd	7.8±0.2 abc	9.5±0.2 e	7.7±0.3 abc	8.2±0.3 bcd	7.5±0.6 ab	9.2±2.0 e	7.7±0.4 abc	9.0±0.6 de
Exchangeable bases (mg/L)																
Ca²⁺	151.16±7.05 abc	146.44±6.28 abc	144.63±4.23 bc	145.30±2.79 bc	152.90±7.79 ab	150.37±3.03 abc	156.44±3.59 a	145.78±2.85 abc	152.45±7.29 ab	143.96±5.73 bc	150.02±8.01 abc	144.90±1.52 bc	151.47±6.79 abc	141.37±3.08 c	150.22±3.71 abc	144.33±3.52 bc
K⁺	53.00±7.67 a	49.41±5.25 a	46.65±5.04 a	51.36±3.22 a	53.61±11.64 a	51.23±2.86 a	51.23±6.20 a	48.31±1.49 a	49.64±4.46 a	44.15±6.70 a	48.56±7.15 a	50.97±5.13 a	45.48±4.39 a	45.76±4.09 a	48.82±5.18 a	48.91±6.21 a
Mg²⁺	10.64±0.42 a	10.85±0.55 a	10.68±0.79 a	10.47±0.45 a	10.50±0.87 a	10.26±0.57 a	10.88±0.63 a	9.63±0.91 a	10.50±0.55 a	9.91±0.73 a	10.26±0.76 a	9.94±0.65 a	9.84±0.48 a	10.24±0.33 a	10.48±0.31 a	10.05±0.38 a
Na⁺	1.24±0.39 a	1.60±0.57 a	2.00±1.11 a	1.28±0.38 a	1.81±0.63 a	1.29±0.61 a	1.46±0.50 a	1.19±0.67 a	1.76±0.92 a	1.72±0.83 a	1.41±0.57 a	1.52±0.57 a	1.09±0.63 a	1.40±0.58 a	3.10±5.10 a	1.37±0.40 a
Micronutrients (mg/L)																
Cu	0.02±0.00 c	0.10±0.02 a	0.05±0.03 bc	0.10±0.01 a	0.02±0.00 c	0.11±0.02 a	0.03±0.01 c	0.09±0.03 a	0.08±0.01 ab	0.09±0.01 a	0.11±0.03 a	0.10±0.02 a	0.03±0.01 c	0.12±0.02 a	0.02±0.00 c	0.11±0.0 2 a
Fe	0.00±0.00 d	0.49±0.07 ab	0.17±0.20 cd	0.53±0.17 ab	0.02±0.00 d	0.56±0.09 ab	0.00±0.00 d	0.65±0.12 a	0.37±0.09 bc	0.55±0.18 ab	0.53±0.06 ab	0.60±0.12 a	0.02±0.00 d	0.50±0.11 ab	0.02±0.00 d	0.51±0.0 5 ab
Mn	0.05±0.02 d	2.85±0.59 a	0.56±0.65 cd	2.37±0.96 ab	0.05±0.01 d	3.04±0.93 a	0.07±0.02 d	2.82±0.39 a	1.28±0.52 bc	3.19±0.90 a	2.35±0.31 ab	2.60±0.56 a	0.06±0.02 d	2.83±0.68 a	0.07±0.00 d	2.57±0.4 4 a
Zn	0.00±0.00 d	0.08±0.02 abcd	0.05±0.04 bcd	0.10±0.04 ab	0.00±0.00 cd	0.09±0.02 ab	0.00±0.00 d	0.11±0.02 a	0.10±0.03 ab	0.09±0.04 ab	0.09±0.01 ab	0.11±0.05 a	0.02±0.00 cd	0.08±0.02 abc	0.02±0.00 cd	0.11±0.0 3 a
C	4.07±1.88 a	4.80±2.37 a	10.30±15.37 a	5.58±3.20 a	3.48±1.40 a	6.20±3.28 a	3.68±1.95 a	4.27±1.35 a	3.72±1.02 a	4.73±2.67 a	4.47±1.69 a	5.63±1.87 a	2.88±1.52 a	5.68±2.61 a	3.65±1.42 a	4.78±0.5 7 a
N	1.00±0.54 a	1.50±0.75 a	1.48±1.30 a	1.13±0.61 a	0.85±0.55 a	1.68±0.59 a	0.95±0.58 a	1.43±0.63 a	1.05±0.40 a	0.93±0.65 a	1.05±0.55 a	1.05±0.55 a	0.83±0.51 a	1.22±0.63 a	0.95±0.63 a	1.07±0.7 3 a

1.6.6 Soil moisture fluctuations associated with the development of biocrust

Soil moisture expressed as the percentage by weight of inoculated soil microcosm during irrigation, was significantly different in response to irrigation pulses and days of irrigation application (Fig. 14; Table 8). The type of inocula did not influence water retention in the soil. The effect of the repeated measures was analyzed, which showed to be different on each day of measurement ($p < 0.001$).

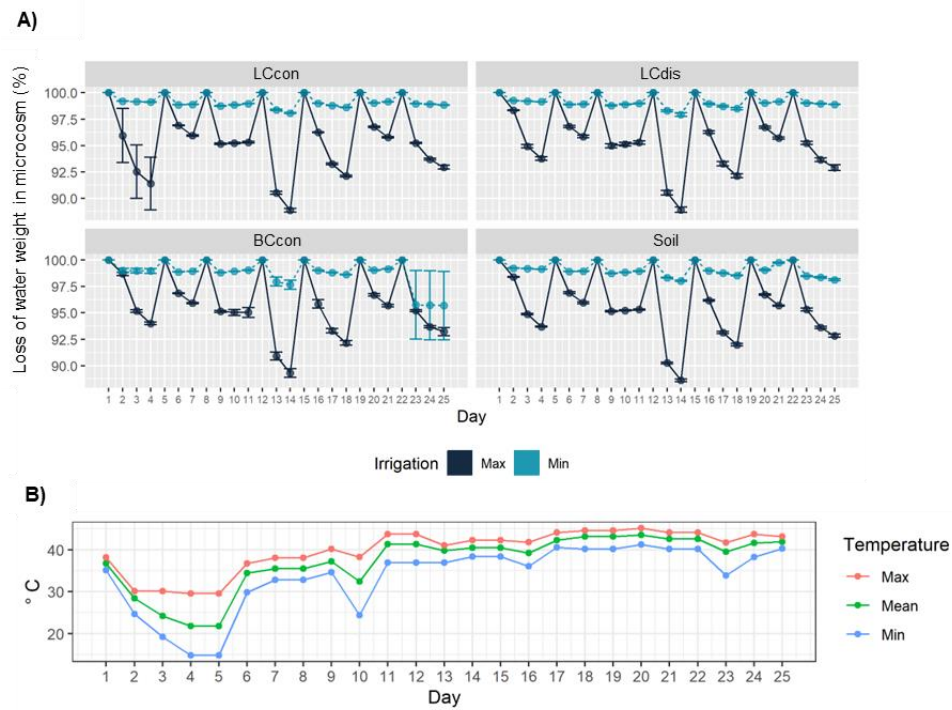


Fig. 14. Daily soil moisture fluctuations. A. Influence of biocrust inoculants and irrigation treatments. B. Daily maximum, minimum and average ambient temperature in greenhouse (°C).

Table 8. Values of moisture changes. Generalized Linear Model, t-family distribution.

Predictors	Estimates	CI	p
(Intercept)	97.63	97.49 – 97.78	<0.001
Inocula1 [LCdis]	0	-0.13 – 0.14	0.963
Inocula2 [LCcon]	0.01	-0.13 – 0.14	0.933
Inocula3 [BCcon]	0.02	-0.11 – 0.16	0.742
Irrigation1 [Max]	-1.77	-1.85 – -1.69	<0.001
Day	-0.02	-0.03 – -0.01	<0.001
Inocula1 * Irrigation1	0	-0.13 – 0.14	0.95
Inocula2 * Irrigation1	-0.03	-0.17 – 0.11	0.679
Inocula3 * Irrigation1	-0.02	-0.15 – 0.11	0.752
Observations	1192		
R ² conditional / R ² marginal NA / 0.760			

1.6.7 Abundance, alpha-diversity and richness of biocrust microbial communities

The results showed that the microbial communities were dominated by the following phyla: 43 % Cyanobacteria, 37% Actinobacteria and 13% Proteobacteria and 7% Chloroflexi (Fig 16 A-C). We identified the presence of Firmicutes, mainly in the BCcon inocula, whose abundance was higher under maximum irrigation and with increasing time of biocrust development.(Fig. 16-B).

At the class level, we found that Cyanobacteria obtained a higher abundance three months after inoculation without influence of irrigation and type of inocula. However, after three months, the abundance of Rubrobacteria increased, without influence of irrigation and inocula (Fig. 15). Permutational analysis of variance (PERMANOVA), showed that the irrigation condition and time of inoculation significantly influenced the microbial community composition (Table 9), being higher in maximum irrigation condition and six months after inoculation (Fig. 16 B-C).

With respect to the number of species and their abundance in the microbial communities, we analyzed the alpha diversity considering the observed richness, Chao1, Shannon-Weaver and Simpson index. The alpha diversity was higher in minimum irrigation than in maximum irrigation treatments, resulting to be significantly different with respect to maximum irrigation, according to the observed richness, Chao1, Shannon and Simpson index ($p < 0.001$). The treatments inoculated with BCcon showed a higher abundance of Firmicutes, compared to the rest of the inocula, and were significantly different ($p < 0.05$ and $p < 0.001$; Table 10).

Table 9. Permutational analysis of variance (PERMANOVA) of the composition of the microbial communities considering inocula, irrigation and time after inocula application.

	<i>Df</i>	<i>Sum Sq</i>	<i>R2</i>	<i>F value</i>	<i>Pr(>F)</i>	
Time	1	0.534	0.00109	1.0700	0.0002	***
Inocula	3	1.466	0.02904	0.9784	0.9749	
Irrigation	1	0.526	0.01043	1.0540	0.0049	**
Time*Irrigation	1	0.526	0.01043	1.0540	0.0071	**
Time*Inocula	3	0.166	0.00092	0.4473	0.8300	
Irrigation*Inocula	3	0.112	0.00062	0.3026	0.9130	
Inocula*Irrigation*Time	3	1.302	0.00721	3.5104	0.9502	
Residual	95	47.439	0.93999			
Total	110	52.071	1.00000			

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

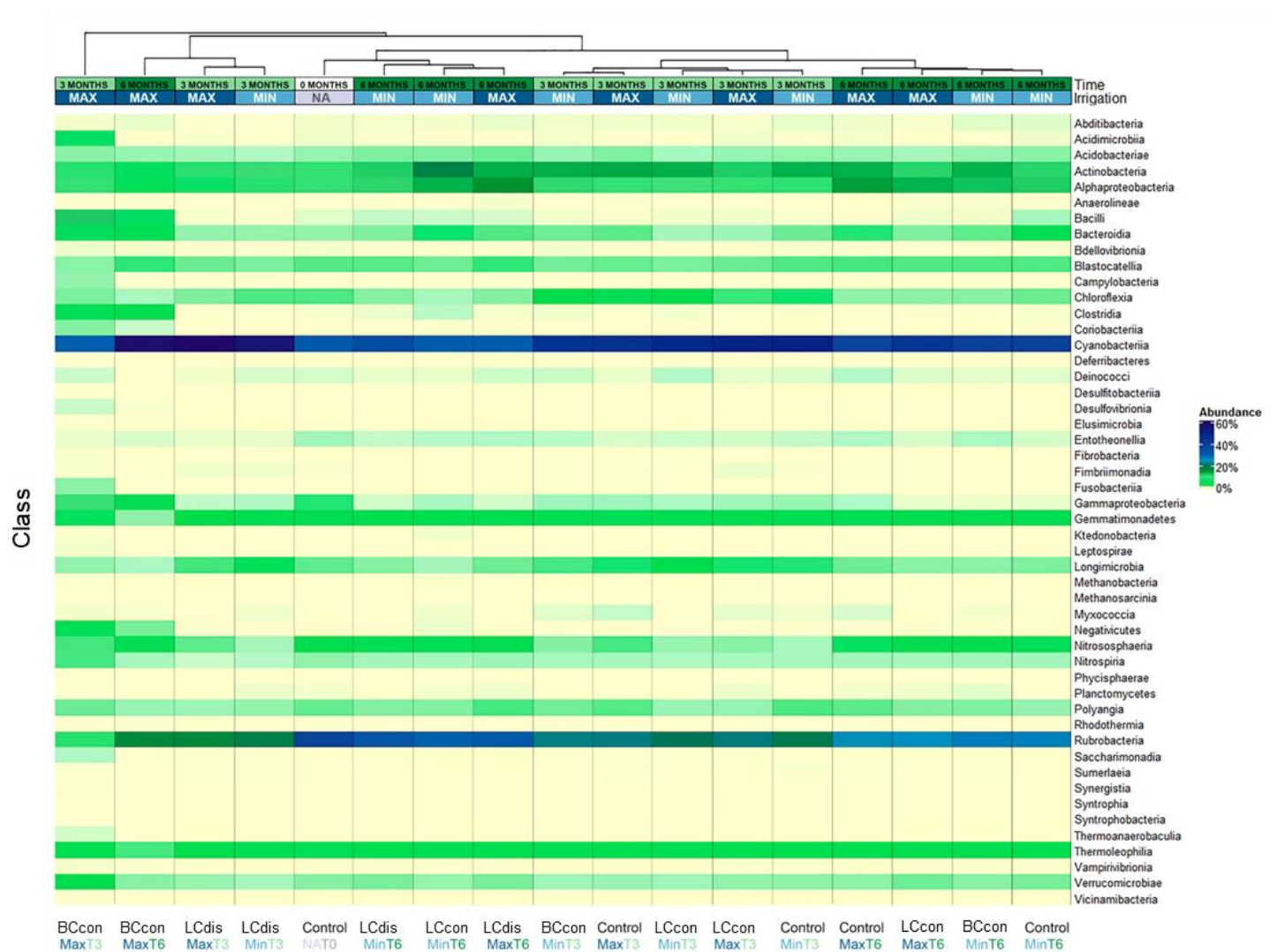
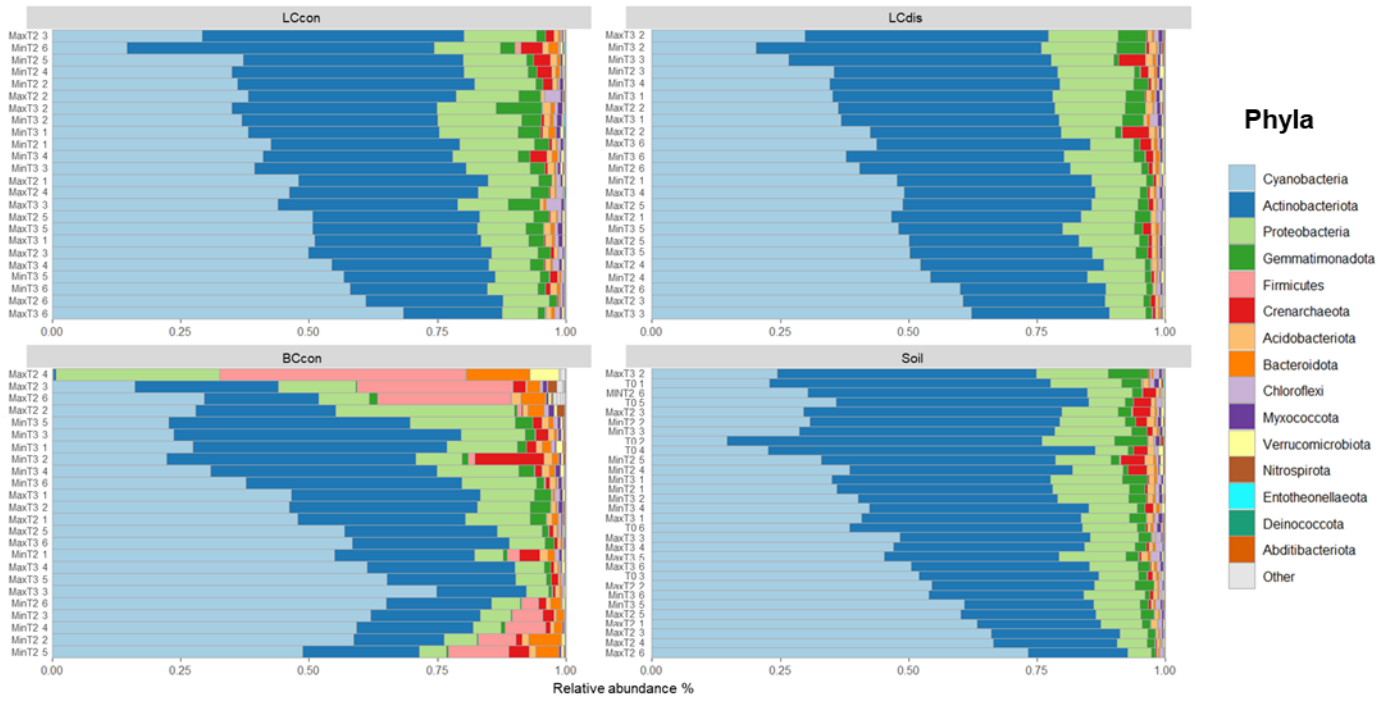
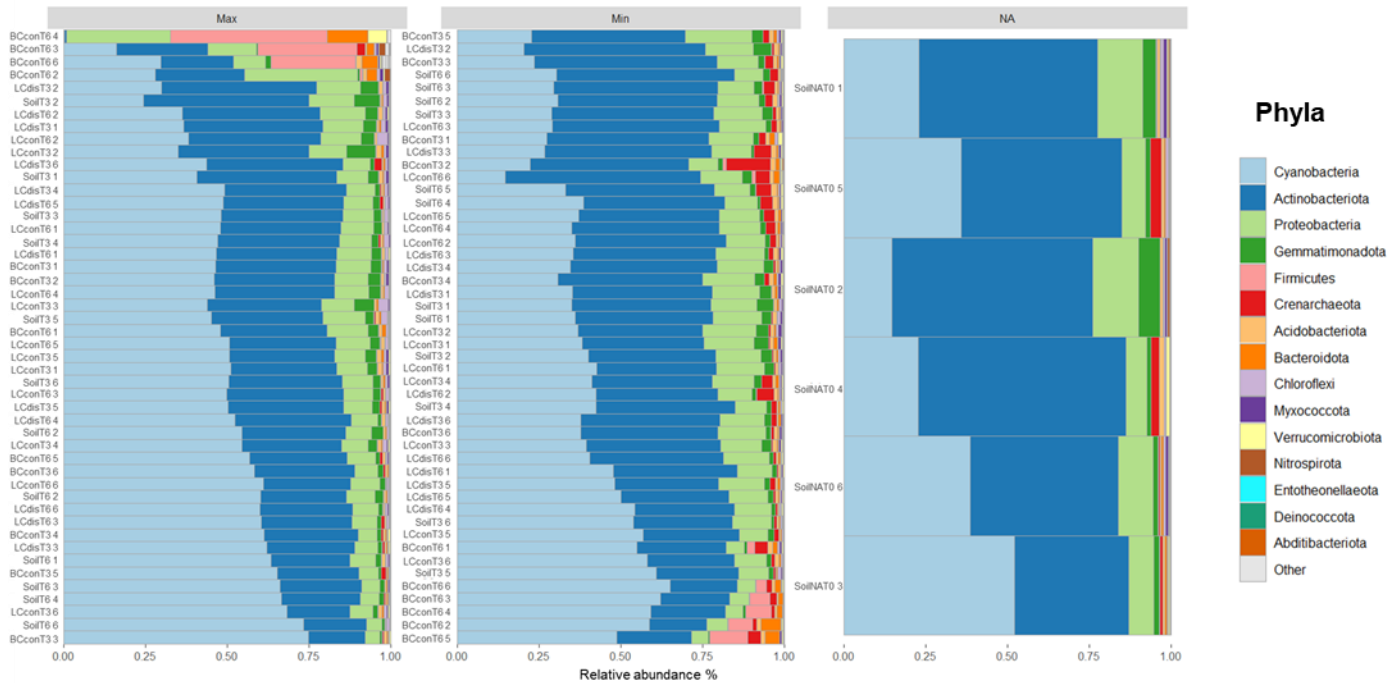


Fig. 15. Bacterial community composition of biocrust inoculation treatments. *Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis), with minimum (Min) and maximum (Max) irrigation conditions at three months (T3) and six months (T6) after inocula application.* Heatmap was created with the average of the relative abundance of the Class. Clustering is based on Bray Curtis distance.

A)



B)



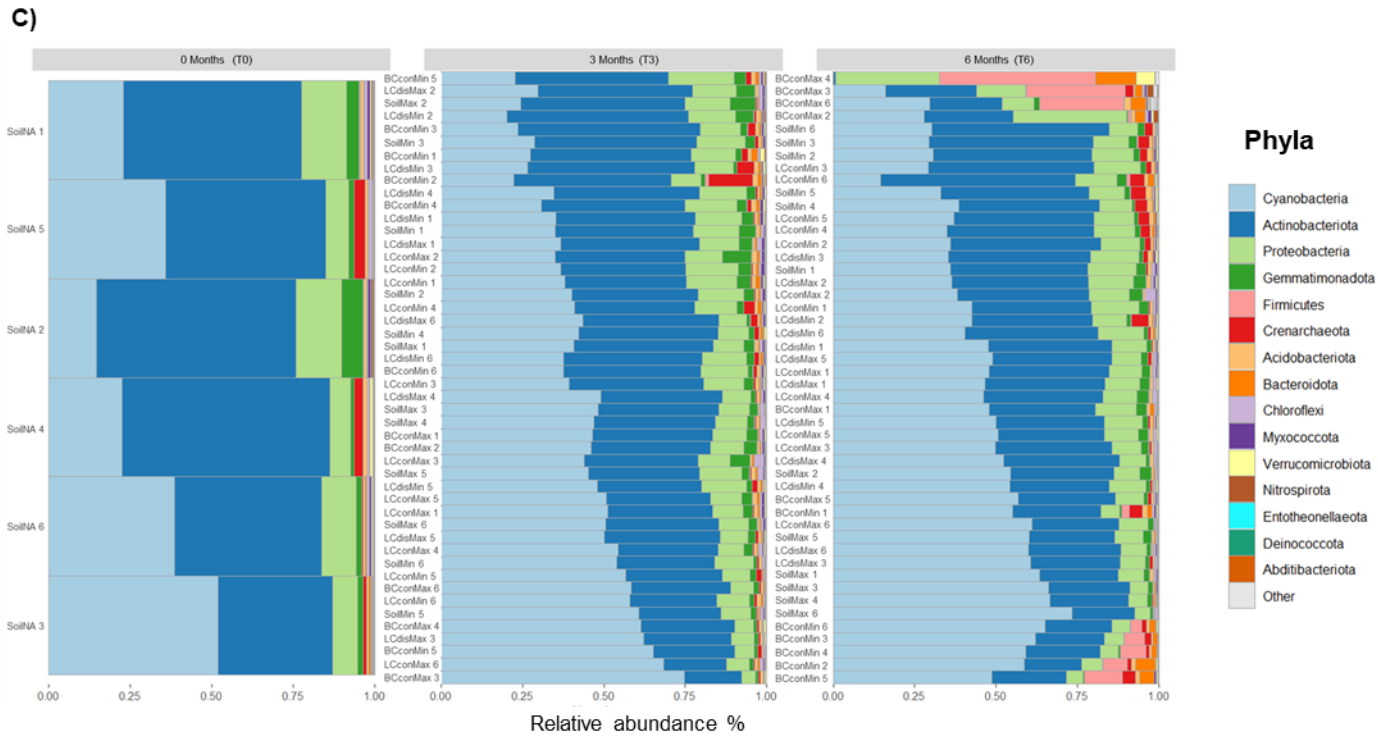


Fig. 16. Composition of biocrust bacterial communities at phylum level. A. Inocula, B. Irrigation, C.me after inoculation D. General composition. *Inoculants: light crust (LC), dark crust (BC); and site of origin: conserved (con) and disturbed (dis), under in minimum (Min), maximum (Max) irrigation conditions and no irrigation (NA), at time (zero – before inoculation), three months (T3) and six months (T6) after inoculation. Number 1 to 6 refer to the six replicates.*

Table 10. Linear model for alpha diversity indices.

<i>Predictors</i>	<i>Observed</i>			<i>Chao1</i>			<i>Shannon</i>			<i>Simpson</i>		
	<i>Estimates</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>	<i>Estimates</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>	<i>Estimates</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>	<i>Estimates</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>
Irrigation [Max]	5961.33	5288.03 – 6634.64	<0.001	7291.8	6291.69 – 8291.92	<0.001	8.21	8.07 – 8.36	<0.001	1	1.00 – 1.00	<0.001
Irrigation [Min]	6481	5807.69 – 7154.31	<0.001	8049.58	7049.47 – 9049.69	<0.001	8.32	8.17 – 8.46	<0.001	1	1.00 – 1.00	<0.001
Inocula [CCcon]	-323.67	-1275.87 – 628.53	0.501	-374.53	-1788.90 – 1039.84	0.6	-0.08	-0.29 – 0.12	0.415	0	- 0.00 – 0.00	0.502
Inocula [CCper]	-681.17	-1633.37 – 271.03	0.158	-1032.9	-2447.27 – 381.47	0.15	-0.14	-0.34 – 0.06	0.173	0	- 0.00 – 0.00	0.319
Inocula [CNcon]	-1450	-2402.20 – - 497.80	0.003	-2052.77	-3467.14 – -638.40	0.005	-0.39	-0.60 – -0.19	<0.001	0	-0.00 – - 0.00	<0.001
Time [6 months]	347.33	-604.87 – 1299.53	0.47	452.39	-961.98 – 1866.76	0.526	0.06	-0.14 – 0.27	0.548	0	- 0.00 – 0.00	0.892
Irrigation [Min] × Inocula [CCcon]	12.67	- 1333.95 – 1359.28	0.985	-147.14	-2147.36 – 1853.08	0.884	0.02	-0.26 – 0.31	0.869	0	- 0.00 – 0.00	0.835
Irrigation [Min] × Inocula [CCper]	-153	- 1499.61 – 1193.61	0.822	-244.57	-2244.79 – 1755.65	0.808	-0.01	-0.30 – 0.28	0.953	0	- 0.00 – 0.00	0.949
Irrigation [Min] × Inocula [CNcon]	1186.5	-160.11 – 2533.11	0.083	1658.71	-341.51 – 3658.93	0.103	0.35	0.06 – 0.64	0.019	0	0.00 – 0.00	0.003
Irrigation [Min] × Time [6 months]	-266.83	- 1613.45 – 1079.78	0.694	-344.95	-2345.17 – 1655.27	0.732	-0.05	-0.34 – 0.24	0.74	0	- 0.00 – 0.00	0.895
Inocula [CCcon] × Time [6 months]	372.17	-974.45 – 1718.78	0.584	400.9	-1599.33 – 2401.12	0.691	0.13	-0.16 – 0.42	0.378	0	- 0.00 – 0.00	0.344

Inocula [CCper] × Time [6 months]	543	-803.61 – 1889.61	0.425	960.8	-1039.42 – 2961.02	0.342	0.09	-0.20 – 0.38	0.539	0	-	0.00 – 0.00	0.673	
Inocula [CNcon] × Time [6 months]	425	-921.61 – 1771.61	0.532	434.87	-1565.35 – 2435.09	0.666	0.23	-0.06 – 0.52	0.116	0		0.00 – 0.00	0.007	
(Irrigation [Min] × Inocula [CCcon]) × Time [6 months]	365.17	-	1539.23 – 2269.57	0.704	821.23	-2007.51 – 3649.97	0.565	-0.01	-0.42 – 0.40	0.965	0	-	0.00 – 0.00	0.67
(Irrigation [Min] × Inocula [CCper]) × Time [6 months]	215	-	1689.40 – 2119.40	0.823	140.17	-2688.57 – 2968.91	0.922	0.05	-0.36 – 0.45	0.821	0	-	0.00 – 0.00	0.965
(Irrigation [Min] × Inocula [CNcon]) × Time [6 months]	-193.83	-	2098.23 – 1710.57	0.84	-84.11	-2912.85 – 2744.63	0.953	-0.18	-0.59 – 0.22	0.371	0	-	0.00 – 0.00	0.076
Observations	96			96			96			96				
R ² / R ² adjusted	0.985 / 0.982			0.978 / 0.973			1.000 / 1.000			0.404				

1.7 Discussion

1.7.1 Development of biocrust: Effect of irrigation and time in the inoculation of disturbed soil

Chlorophyll a production is one of the best indicators at micro-scale of biocrust development that can be used to assess developmental stages, as well as the response to disturbances events, climatic variability, or during ecological restoration (Chamizo *et al.*, 2020; Mallen-Cooper *et al.*, 2020; Román *et al.*, 2019; Zaady *et al.*, 2010). It reflects the capacity of the organisms to fix atmospheric carbon (C) and potentially nitrogen (N), and consequently biomass production of biocrust constituents, such as of cyanobacteria and cyanolichens (Román *et al.*, 2019).

The maximum irrigation condition and the six months after inoculation produced significantly more chlorophyll a content, than minimum irrigation and three months after inoculation ($F_{1,80} = 5.111, p=0.026$) (Fig. 4-A; Tukey 0.05). For example, the inoculation treatments with LCdis, composed mostly of cyanobacteria and some lichens, produced higher chlorophyll a content six months after inoculation (Fig. 4-B), suggesting that the inocula of biocrust from the disturbed site, make better use of the water pulses for chlorophyll a production compared to those of the conserved site (livestock excluded; LCcon, BCcon) ($F_{3,8} = p<0.001$; Table 3).

However other microorganisms, tend to be activated at different moisture levels, producing, exchanging or utilizing resources depending on those levels (Collins *et al.*, 2008; Nielsen & Ball, 2015). It is very frequent that they react favorably to higher pulses of water, increasing their photosynthetic capacity, and with this the N dynamic in the soil and vegetation (Kwiecinski *et al.*, 2020). In contrast with plants that require greater infiltration to stimulate photosynthesis, the biocrust is metabolically activated by small pulses of water (Huxman *et al.*, 2004; Kwiecinski *et al.*, 2020; Thomey *et al.*, 2011).

The amount of chlorophyll a can change with respect to the amount of rainfall received and ambient humidity (Kwiecinski *et al.*, 2020), suggesting that, according to new predictive models of climate variability, it will affect biological activity mainly in nutrient cycles such as N. The C and N concentration of inoculated soil in all treatments of biocrust inocula, level of irrigation and time post-inoculation, did not show significant changes (Table 7). This response may be due to the time of nutrient fixation, mainly associated with the development of the microbial community, or to the water infiltration capacity, a variable responsible for

nutrient transport to the soil. Water infiltration is a variable not used in the present study, however; it is strongly linked to the production of exopolysaccharides (EPS) in the development of biocrust, capable of favoring or repelling infiltration (hydrophobicity) (Kidron, 2021).

The EPS produced by inoculated biocrusts in disturbed soil is an indicator of biocrust development associated with key soil factors, such as roughness, aggregate stability, water infiltration, nutrient fixation, surface resistance, and protection from desiccation and UV radiation (Bowker *et al.*, 2008; Chamizo *et al.*, 2018; Karimi *et al.*, 2022). Their production is linked to the dominance of some species of the microbial community and development time; it has been recorded that *Microcoleus vaginatus* ATHK43, manages to consolidate its ecological functions attributed to EPS and Chlorophyll a, three months after inoculation (Karimi *et al.*, 2022). Our results showed that the biocrusts produced higher EPS six months after inoculation and increased their production three months post-inoculation (Fig. 5-A), widely described by cyanobacteria (Chamizo *et al.*, 2018, 2019, 2020; Mugnai, Rossi, Felde, Colesie, Büdel, Peth, Kaplan, & De Philippis, 2018; Román *et al.*, 2021). On the other hand, it was found that during the development of the biocrust, the EPS production was not limited for the irrigation condition, as is the case for chlorophyll a ($p>0.05$; Table 3). Although it has been reported that EPS under dry conditions produce higher EPS content, mainly by biocrusts dominated by *Scytonema hyalinum* and *Tolypothrix falsea* (Román *et al.*, 2021). This is interesting, since EPS are highly hygroscopic and absorb water from the environment, protecting cells from radiation levels in arid areas; additionally, cyanobacteria require pulses of water to reactivate their photosynthetic metabolism and thus remain in a desiccated state under dry conditions (O. L. Lange, 2003). However, the EPS production has greater influence depending on the composition of the microbial community (Chamizo *et al.*, 2018; Román *et al.*, 2021; Zheng *et al.*, 2011). For example, *N. commune* produces higher amount of EPS than in consortium with *S. hyalinum* and *T. falsea* (Román *et al.*, 2021).

In our results, the treatments did not show significant differences in the type of inocula (Table 3). This is because the abundances of our treatments did not show significant differences in the inocula. Although the irrigation condition and inocula type did not interfere with EPS production, in the soil aggregate stability resulted significantly different in irrigation conditions and inocula time ($F_{1, 80} = 4.791$, $p=0.0315$; Table 4). The results showed that aggregate stability before inoculation was 10% stable and 25% to 75% three and six months,

respectively after inoculation (Fig. 6), according to the aggregate stability classes of (Herrick *et al.*, 2001). These results prove the improvement of aggregate stability after inoculation process as suggested by other research (Antoninka *et al.*, 2019; Faist *et al.*, 2017; Fick, Day, *et al.*, 2019). However, the soil aggregate stability is not always enhanced by irrigation condition or different types of inocula, even in addition with soil stabilizing agents (Antoninka *et al.*, 2019).

However Fick, Barger, *et al.*, (2019), reported that aggregate stability is correlated with moisture and is promoted by EPS (Bowker *et al.*, 2008; Chamizo *et al.*, 2018). This allows explaining the results obtained from the moisture measurements, which do not indicate significant differences between inoculants or irrigation type (Table 8), it can be confirmed with the results of EPS and aggregate stability; it does not vary between inoculants, but instead over experimental time (Fig. 5-A, 6-B). In addition, the moisture values were measured in samples corresponding to six months after being inoculated. Therefore, in future research, moisture should be measured during the biocrust development period after the soil has been inoculated since it is known that moisture can change according to the type of inocula (Kheirfam & Roohi, 2020). Similarly, another important aspect that correlates with aggregate stability and EPS is the roughness (Kidron *et al.*, 2020). The roughness is promoted by biocrust coverage, and requires time for its development (Antoninka *et al.*, 2019; Kheirfam & Roohi, 2020; Young *et al.*, 2019). However, in the developed experiment, we observed that roughness did not show significant differences until six months after soil inoculation (Fig. 7-B). This suggests that in our experimental conditions (Table 1), the aggregate stability development does not depend of biocrust inocula type and irrigation conditions. In fact, the development time of biocrusts by inoculation of microorganisms, especially cyanobacteria, was estimated after 120 days, and the soil aggregate stability and roughness continues to increase afterward (Fick, Barger, *et al.*, 2019; Kheirfam & Roohi, 2020).

The metagenomic analysis showed that at the class level, cyanobacteria were found in greater abundance in all treatments, as well as Chloroflexi, although it presented low relative abundance. The treatments inoculated with the BCcon inocula presented a higher content of TB-EPS and chlorophyll a, due to a higher abundance of Firmicutes (Fig. 16-A). All biocrust inoculants of soil inoculated treatments, developed light crust coverage, including the microcosm of soil without inocula (Fig. 10), while decreasing bare soil over time in three and six months after inoculation ($p < 0.001$; Table A1) (Table 2; Fig. 9), suggesting that the

biocrusts can recolonize light crust coverage only with water pulses. This change in the coverage is linked to the development of successive stages of biocrust, mainly dark crust and lichen, which require more time for their development (Fig. 8-B) (Miralles *et al.*, 2020). The amount of water (irrigation condition) and time of development are the important factors for recovery of biocrust based to inoculation process on the disturbed soil (Table 5). The maximum irrigation condition increased the dark crust and lichen cover, (Fig. 11-B; 12-B), since the dark pigmented cyanobacteria require more water consumption (Belnap, 2003). The development of lichens obtained a higher coverage from the inoculation by the light crusts inoculants (LCcon and LCdis), without distinction to the site of origin, while the soil microcosms without inocula and inoculated with BCcon, offered low rates of colonization of lichen coverage. Moreover require more time for their development compared to the light crust coverage, since they are the microorganisms most vulnerable to desiccation by hydric stress (Dojani *et al.*, 2011; Miralles *et al.*, 2020). Although, it is important to maintain the cohesion of soil particles, promoted by cyanobacterial filaments and their EPS, which provided more resistance and adaptability (Miralles *et al.*, 2021). However, the associated microbial community, establishes a wide diversity of bacterial taxa (Maier *et al.*, 2014). It allows to explain the increase in their coverage, three months after inoculation, when the development of light and dark crusts (highly composed of cyanobacteria) were increasing and decreased when lichen coverage increased.

Consequently, the development of roughness on the inocula soil surface is formed by the lichen cover, which plays important functions such as sediment trapping and soil stability (Bowker, 2007; Eldridge & Rosentreter, 1999; Langhans *et al.*, 2010). We found that the development of roughness, is not related to a type of inocula biocrust and irrigation condition (Fig.7-B; Table 4), suggesting that all inoculants contribute to its formation. In contrast with other research, the roughness can change depending on the type of biocrust that is colonized and the intensity of disturbance, such as livestock trampling (Antoninka *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020).

The effect of irrigation on the development of the cover has generated highly significant effects. In fact, this condition determines the physicochemical properties of the soil and the assembly of the microbial community, developing the stages of the biocrust, due to the activation of certain microorganisms that remain desiccated when exposed to water. The activation of microorganisms stimulates the production of cellular metabolites such as chlorophyll a, EPS, oxalates, and acid compounds, such as gyrophoric acid, lecanoric acid,

usnic acid, among others, which have diverse ecophysiological functions, such as tolerance to UV radiation, drought and high temperatures (Cockell & Knowland, 1999; Dickensheets *et al.*, 2000; Edwards, 2007; Miralles *et al.*, 2012, 2020; Wynn-Williams, 2000).

Another important parameter in the development of the microbial community is soil moisture, which below the biocrust layer increases the stability of the aggregates of soil (Chamizo *et al.*, 2012; Miralles *et al.*, 2020). Thus, the biocrusts with lichens develop when there is higher soil moisture, increasing the nutrients in the soil and consequently the diversity of microorganisms. In addition, soil moisture itself influences the formation of microbial communities, since microorganisms depend on water to maintain their cellular activity under normal conditions and below the species specific water potential (Miralles *et al.*, 2020; Moyano *et al.*, 2013).

The improvement of the physical, chemical, and biological properties of the soil, attributed to these functions of the biocrust, cause the new biocrusts to be more competitive, in resource consumption because they acquire more positive feedback from the soil, causing the replacement of the previous biocrust (Lázaro *et al.*, 2008; Miralles *et al.*, 2020). As is the case with the development of dark crust and lichen cover, which reached a higher percentage of cover in maximum irrigation pulses, compared to light crust cover. Moreover, the metagenomic analysis showed that Firmicutes increased in treatments with maximum irrigation pulses, while Actinobacteria and Cyanobacteria remained in both conditions in similar abundances (Fig. 16-B)

Recently Trexler *et al.*, (2023), found that Actinobacteria and Proteobacteria members are able to remain inactive in very wet soils, due to their higher activity in xeric environments, which may indicate their particular niches in the biocrusts, while Firmicutes and Actinobacteria actively develop when exposed to water (Fig. 16-B). This describes the influence of irrigation in our study, which shows that the more water, the more soil aggregate stability (Fig. 6; Table 4), biocrust coverage (Fig. 8), and the chlorophyll a (Fig. 4-A). However, the presence of Firmicutes in treatments inoculated with the inocula from the disturbed site (LCdis) and the soil was null, contrary to what happened with the rest of the inocula from the conserved site (LCcon and BCcon), in which the presence of Firmicutes required maximum pulses of water to activate their functions (Fig. 16-A). In other studies, it has been shown that irrigation limits the success of inoculation process and biocrust

development, even when there are different irrigation pulses (Maestre *et al.*, 2006; Roncero-Ramos *et al.*, 2019; Velasco Ayuso *et al.*, 2017).

1.7.2 Response of the physicochemical properties of soil in the recovery process of biocrust.

The analysis of soil physical and chemical properties, such as micronutrients (Fe, Mn, Zn and Cu) and exchangeable bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , and K^+) (Fig. 13; Table 7) show that irrigation and time promote a higher production of Mn, Fe, Ca^{2+} and Mg^{2+} , suggesting that the biocrust inoculation process favors soil fertility, including C and N fixation, which were obtained in low production, possibly due to the cyanobacteria species found in the inoculated treatments, without having presented significant changes in the inocula (Table 9). Although an increase in chlorophyll a, indicates the content of organic carbon fixed by cyanobacteria (Belnap *et al.*, 2016) and in turn is used to synthesize LB-EPS (Roncero-Ramos *et al.*, 2019). In addition, the cyanobacteria, fungi and lichens secreted chelating agents and form water-soluble complexes, facilitating their availability to cryptogams, some desert plants and enhancement in the soil (He *et al.*, 2019; W. Lange, 1974; Marschner, 2011).

Some studies suggest that nitrogenase activity (nitrogen fixation enzyme), present in heterocyst cyanobacteria (Chamizo *et al.*, 2019), requires more time for development, since it is likely that there are changes in species composition and biomass during the development of the biocrust; however, factors such as humidity, light and temperature changes directly affect nitrogenase activity (Zhao *et al.*, 2010). On the other hand, the results obtained reflect a low amount of C and N, mainly attributed to the microbial composition, as other studies attribute high fixation rates to key microorganisms, such as Nostocaceae, Scytonemataceae and Chloroflexi (Q. Wang *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2021), and other organisms associated with biocrusts with higher stages of development, which have higher carbon and nitrogen fixation potential (Housman *et al.*, 2006; X. R. Li *et al.*, 2012; Su *et al.*, 2011), such as lichens and mosses, whose metabolic pathway is different with respect to early biocrusts (Tian *et al.*, 2023).

The Macro and micro nutrients as the C, N, P, Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} and Cu, Fe, Mn, Zn, respectively, contribute to composition and distribution of biocrust and are essential to the survival, and physiological activities (Bowker *et al.*, 2016; He *et al.*, 2019). A higher concentration of Mn is correlated with an abundance of lichens, mainly *Collema tenax*, which were not very dominant in our lichen cover (Fig. 12 F) (Bowker *et al.*, 2005). However, other

studies have shown that the coverage of lichens was positively related with Fe, Mg, and Ca, while diversity is negatively associated with Mn and Zn (Ochoa-Hueso et al., 2011). The biocrusts are able to recover nutrient levels in the soil after long years of recovery, as the development of biocrust cover, mainly those formed by cyanobacteria and lichens, are correlated with an increase in the concentration of Mg, Mn, Cu y Fe, and those more developed and dominated by mosses, highly correlated with K⁺, Mg²⁺, Mn, Zn, Cu y Fe, suggesting that biocrust recovery improves nutrient accumulation, soil fertility and nutrient cycling in desertic ecosystems (He et al., 2019). From the results obtained, we express the importance and usefulness of quantifying the concentration of metals in the soil in the processes of restoration of arid zones from the inoculation of biocrust. This will allow us to know the influence of the biocrust in soil improvement and the recovery of ecological functions, acquiring a more integral approach in the socio-ecological system.

1.7.2 Effect of inoculation with different inoculants of biocrusts on the microbial community.

In studies of the microbial community composition of the biocrust, the phyla Actinobacteria, Firmicutes, Bacteroidota, Cyanobacteria and Proteobacteria, have been recognized as the most abundant taxa in the biocrust (Karaoz et al., 2018; Miralles et al., 2020; Steven et al., 2014; Trexler et al., 2023; Van Goethem et al., 2019; J. Wang et al., 2020). Actinobacteria and Proteobacteria promote niches in the biocrust communities, due to the regulation of their functions during wet or very xeric soil conditions (Trexler et al., 2023). In the present study, Actinobacteria and Cyanobacteria, were the most abundant phyla in all treatments, exposed at minimum and maximum irrigation pulses of water, and inoculated with different biocrust inoculants, at different time after inoculation. In addition, the amount of water in the irrigations and time post-inoculation generated significant effects on the composition of microbial community (Table 9). However, in the treatments inoculated with BCcon, showed more abundance of Firmicutes (Fig. 16-A), which stand out for their high activation response under conditions of higher humidity (Karaoz et al., 2018; Trexler et al., 2023).

The highest production of cellular metabolites such as chlorophyll a was identified in treatments inoculated with LCdis (Fig. 4-B), exposed under minimum irrigation conditions. On the contrary, the treatments inoculated with LCcon and BCcon showed low chlorophyll a content and a higher relative abundance of Firmicutes, mainly in treatments inoculated with BCcon inocula (Fig. 16-A). This coincides with the hypotheses of the study, firstly we establishment that the disturbed soil treatments inoculated with biocrust from conserved site

presents higher diversity and faster development of biocrust, than those inoculants from the disturbed site. However, the production of chlorophyll a, EPS and the functions associated with these metabolites in the soil, such as soil aggregate stability and roughness, occurs better in microcosms of soil inoculated with biocrust from the disturbed site (LCdis), contrary to what was established in this hypothesis. On the other hand, the composition of microbial community changes continuously through irrigation patterns, manifesting more significant microbial activity in large pulses of water conditions than in small, as is the case with the development of Firmicutes.

This situation represents a very important advance in the selection of inoculants and the development of techniques for restoration in arid areas with biocrust. From the results obtained by the sequences, it is possible to explain the use of water in minimum irrigation pulses which is due to the high abundance of cyanobacteria, which produced a greater amount of chlorophyll a mainly in inoculants such as LCdis and the soil without inocula, which are found in disturbed sites; with respect to those in the conserved site (LCcon and BCcon). On the other hand, the similarity of TB-EPS and LB-EPS production between inoculants refers to the similarity in the taxa present in the microbial community, considering the changes that occur at the level of irrigation and time, which are consistent in the evaluated parameters: chlorophyll a, EPS, roughness, and stability of aggregates. Exposure to irrigation, and time in the inocula treatments, are factors that can generate significant changes in the development of the microbial community, as well as its diversity (Fig. 15; Table 10). However, there are other factors that can modify the composition and development of the microbial community such as soil type (Abed *et al.*, 2019), climate change (Choi *et al.*, 2017; de Vries & Griffiths, 2018), and the physical and chemical properties of soils, such as pH, organic carbon and the amount of salts, which defines possible changes in the metagenome (Goldfarb *et al.*, 2011; Griffiths *et al.*, 2011; Lauber *et al.*, 2009; Sánchez-Marañón *et al.*, 2017); same factors that influence the success of inoculation with biocrusts (Roncero-Ramos *et al.*, 2019).

The development of successive stages of the biocrusts, such as light crust, dark crust and lichen cover, soil the structure of the microbial communities, and therefore the abundance of species (Miralles *et al.*, 2020). This is important to support the second hypothesis, since irrigation is an important factor in the development of the microbial community, mainly for those microorganisms better adapted in drought conditions. Román *et al.*, (2021) confirmed that some species of cyanobacteria can easily survive and colonize some soils in laboratory

conditions with lower water availability (180 mm), even the colonization rate and cell metabolite gain is like wetter conditions (380 mm). In comparison to this study, our experimental design simulated rainfall conditions associated with drier (110 mm) and wetter (789 mm) weather periods over the past 10 years. The results show that, species diversity changes in this irrigation regime, and the development time after inoculation, so there are differences in the development of cell metabolites such as chlorophyll a and EPS, and consequently the functions attributed to them as the assimilation of nutrients in the soil, the stability of aggregates and the development of biocrust cover and roughness. Suggesting that biocrusts can regulate their functioning and contribution to the soil under climate variability scenarios.

Some species of cyanobacteria are present with a higher abundance, for example *Leptolyngbya* sp. a group of cyanobacteria very abundant in the early stages of the biocrust, decreasing their abundance in developed biocrusts, with high lichen cover (Pushkareva *et al.*, 2015). This may explain the decrease in abundance in treatments inoculated with LCdis and LCcon, which obtained higher lichen cover development (Fig. 12). In addition, in their habitat, they dominate areas with greater exposure to the sun, responding favorably to stress caused by high temperatures and radiation. Likewise, prolonged periods of drought seem to be an important factor that explains their presence and highlights their resistance to stress. Some species of cyanobacteria show a greater similarity between different species of the genus, since they share the same response mechanism to drought stress (Bruno *et al.*, 2009; Miralles *et al.*, 2020; Nakamori *et al.*, 2014). This may explain the effect of humidity between inoculants, which did not show significant differences (Table 8), since they are thermophilic microorganisms as the some cyanobacteria species that have developed a series of adaptations to survive in these conditions, such as their water retention capacity (Bruno *et al.*, 2009). Similarly, the higher abundance of Cyanobacteria and Actinobacteria found in all inoculated treatments, allows understanding the null difference found in the production of both fractions of EPS, and therefore would result the same in the parameters associated with EPS, such as aggregate stability and roughness of the biocrust. These significant effects are attributed to the higher levels of irrigation and development time, an effect caused by the abundance of Firmicutes, which increased under the influence of these two factors. Firmicutes have been studied extensively, mainly in exposure to different water pulses; demonstrating their rapid development as soon as 9 hours after wetting the biocrust (Karaoz *et al.*, 2018; Swenson *et al.*, 2018; Van Goethem *et al.*, 2019) and recently Trexler

et al., (2023) reported 10 Firmicutes families active 4 hr after soil wetting, on the contrary, the results presented, show a significant change three months after inocula, associated to the production of metabolites such as chlorophyll a and EPS.

Some cyanobacterial filaments are able to generate effects on biocrust roughness and EPS production, mainly in *N. commune*, recognized as a hydrological driver of major importance on the biocrust surface (Rodríguez-Caballero *et al.*, 2012; Roncero-Ramos *et al.*, 2019), and *Microcoleus sp.* mostly recognized as a pioneer in biocrust development, (Karimi *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2011). On the other hand, the Rubrobacter class (Fig. 15) presented higher relative abundance in the conditions of irrigation and time after inoculation; however, its presence in the biocrust communities could be influenced to CO₂ fixation, due to the metabolic diversity it possesses. Miralles *et al.*, (2012) have pointed out that focusing efforts on microorganisms of this class, could recognize potential of arid soils as CO₂ sinks, and their usefulness in soil restoration strategies through inoculants.

1.7.3 Inoculation strategy for biocrust recovery.

The present study tested the recovery capacity of biocrusts from two different sites, disturbed by livestock and conserved (exclude to livestock), in a site with the same landscape unit, in which geophysical and chemical properties of the soil do not change compared to the inocula sources. Additionally, the LCdis inocula produces greater photosynthetic biomass with low water pulses, compared to the rest of the inoculants and the soil. Other studies have addressed the success of inoculation with selected cyanobacterial groups or consortia (Chamizo *et al.*, 2020; Faist *et al.*, 2020, 2020; Karimi *et al.*, 2022; Mugnai, Rossi, Felde, Colesie, Büdel, Peth, Kaplan, & De Philippis, 2018; Velasco Ayuso *et al.*, 2017; J. Wang *et al.*, 2020).

The microbial communities respond stochastically to irrigation events and change over time (Trexler *et al.*, 2023), so it is of vital importance and should be addressed in depth in the following studies that seek to promote the restoration of arid zones and the development of biocrusts, mainly due to atypical precipitation events caused by climate variability. In the last 10 years, the restoration of arid zones from the induction of biocrust has been tested, either by isolating and selecting certain groups of cyanobacteria, mosses or lichens, in a simple way (only biocrusts) or compound (with soil stabilizing agents) (Antoninka *et al.*, 2019; Bowker, 2007; Chock *et al.*, 2019b; Giraldo-Silva *et al.*, 2019). However, its large-scale application depends on the availability of undisturbed biocrusts (Faist *et al.*, 2020). In

addition, the moisture of the inoculated soil surface, provides the establishment of inoculated cyanobacteria (Zhou *et al.*, 2020), so the presence of shade, in addition to reducing exposure to ultraviolet radiation, and the temperature of the soil surface (Antoninka *et al.*, 2019), preserves soil moisture, contributing to the formation of biocrust.

The success of in situ biocrust recovery can be limited by environmental filters that threaten its expansion, such as environmental stress, resource limitation, livestock grazing, weeds, and sediment deposition. By reducing these filters, greater success is possible; however, their natural recovery can be as effective as current recovery methods (inoculation), depending on the initial conditions of the study site (Faist *et al.*, 2020), even if it involves long periods of time (Briggs & Morgan, 2012; Concostrina-Zubiri *et al.*, 2014; Condon *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2017).

The development time also depends on the taxonomic composition of the microbial community and the conditions in which it is found, mainly the exposure to water either induced or by natural precipitation. The results demonstrate that biocrusts from both sites are able to develop biocrusts and directly influence soil properties, highlighting the influence of irrigation, a key factor in these processes, since the need for water as a vital resource in the restoration or rehabilitation of ecosystems, requires a lower amount of water consumption, and promote a higher rate of development, not only in its biocrust coverage, but of metabolites that ensure soil stability, in terms of its structure and fertility, as demonstrated by the LCdis inocula in the microcosms of disturbed soil inoculated.

Likewise, in the simple inoculation of cyanobacteria, their development and the production of photosynthetic biomass, as well as extracellular compounds occurs from 40 (Chamizo *et al.*, 2018, 2020; Fick, Barger, *et al.*, 2019; Lan *et al.*, 2014) and 90 days (Mugnai, Rossi, Felde, Colesie, Büdel, Peth, Kaplan, & Philippis, 2018), under laboratory conditions. And up to 1 year or more, under natural conditions, as they are exposed to disturbance, and inoculants could move threatening biocrust development and its restoration at the site of interest (Kheirfam & Roohi, 2020; Xiao *et al.*, 2015). Contrary to simple inoculation, compound inoculation requires additives that help cyanobacteria function during the adhesion of mineralogical soil particles, so it has been implemented jointly to achieve greater results and optimize resources and efforts in restoration. However, a systemic approach to the problem in the ecosystems or sites to be restored will require the use of strategies in addition to simple inoculation (Antoninka *et al.*, 2019; Bowker *et al.*, 2019; Condon & Pyke, 2016; Peng *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2020).

1.8 Conclusion

Biocrust inoculation processes in ecosystem restoration have been a relevant topic in the last decades. The results obtained show the recovery process of biocrust in a soil disturbed by livestock activity, as well as the effects on the soil produced by the cellular metabolites of the microorganisms of the microbial community, such as chlorophyll a and EPS.

The amount of water exposed in the inoculation processes significantly affects the recovery of biocrust, since some species of microorganisms require a greater amount of water for their development. This implies a greater amount of resources for their functioning and their role in the ecosystem. In the present study, we analyzed three types of biocrusts, two of them from a conserved site excluded of livestock and other from a site disturbed by livestock trampling. The results suggest that the biocrusts from the disturbed site rapidly acquire their cellular functions by taking advantage of the lower amount of water in the first months of inoculation. Since cyanobacteria are the first microorganisms to colonize the biocrust, their first response mechanism is carbon sequestration for the synthesis of carbohydrates, such as LB-EPS, in addition to grouping soil particles and improving soil stability, protect the development of the biocrust cover, which generates a greater or lesser infiltration of water into the soil. Contrary to what was thought with respect to roughness, which is attributed to improve surface runoff and infiltration, it has been reported that EPS have a greater influence than biocrust cover and roughness, since EPS can generate hydrophobicity; although roughness favors runoff and infiltration, it does not imply that the biocrust layer retains water. Likewise, no changes in moisture content associated with irrigation and inocula type were found. Based on the results obtained, we suggested to incorporate hydrophobicity and runoff parameters in the next restoration and soil improvement studies based on inoculation with biocrust, since not considering them would limit the availability of water and other restoration resources.

The light biocrust dominated by cyanobacteria and the one dominated by lichens, both in the conserved site, require more water and time for their development. Therefore, generating biocrust propagules as inoculants could compromise restoration efforts. On the contrary, the light biocrust from the disturbed site, dominated by cyanobacteria and some lichens, showed to use water more efficiently in their production of chlorophyll a, using less water than the rest of the inoculants. However, the effects on the physicochemical properties of the soil, such as EPS production, aggregate stability, cover, and roughness, did not show significant differences between them; however, irrigation and time after inoculation directly

influence their development, although roughness showed that its increase requires long periods of time.

The development of lichens in the biocrust cover required more water for their development than the other cover types: light crust and dark crust. In addition, the development of the different morpho-types of biocrusts depends entirely on the conditions of irrigation and time; however, in the field of restoration, this is important, since the value of soil aggregate stability is a priority issue to prevent erosion, regardless of the type of cover that is developed, even when the importance of the cover is to promote greater hardness and resistance to soil erosion factors. Our results suggest that biocrust inocula did not differ significantly from each other in terms of chlorophyll production, EPS, aggregate stability, cover, and roughness. However, the light crust inocula from the disturbed site offered rapid recovery and greater efficiency in the resources consumed. On the other hand, soil macro and micronutrient content did not change between inocula types, however we recognize its importance to be quantified to know the influence of the biocrust in the recovery of soil functionality and thus in the social-ecological system.

The results obtained suggest that the light crust inocula from the disturbed site (LCdis) could rapidly improve biocrust recovery and its effects on the soil in a short time, with less resources. Eventually, it is expected that biocrust development will become more stable in the inoculated soil. On the other hand, it was observed that the microbial community of the lichen-dominated dark crust inocula of the conserved site (BCcon) presented a higher abundance of Firmicutes, a group of bacteria highly adapted and resistant to hydration-drought cycles. This is interesting for the description of the preserved site in the arid zone of study, since being a preserved biocrust, the abundance of Firmicutes could influence the resilience of the system, something that does not happen with the biocrusts of the disturbed site.

The effect of time in the development of biocrust is not only important for their functions, but also in the restoration processes, in which efforts to reduce material and energy resources must be optimized. This implies that the selection of biocrust propagules with potential for *in situ* recovery should consider resource optimization criteria, mainly water use, one of the challenges that arid zones continuously face, such as the cyanobacteria dominated light crust inocula in the disturbed zone.

This inoculants of biocrust reflects not only its high colonization capacity, but also its performance, which could be attributed to its continued resistance to environmental stresses, such as drought and livestock grazing. In addition, in biocrust inoculation processes, the richness and abundance of species and the conditions of the site to be restored must be considered. Although in our results, the decrease of bare soil, changed rapidly in at least three months, indicating its partial success of development, including the functions associated with the soil, such as aggregate stability, cover growth, roughness and concentration of macro and micronutrients, improving its aggregate stability over time. This result is important, as it allows the construction of a new *in situ* test stage.

Co-diseño de infografías para el reconocimiento funcional de la biocostra.

2.1 Introducción

Las comunidades diversas de biocostra de suelo son altamente abundantes en las tierras áridas, en las que interactúan con las comunidades humanas locales y contribuyen a los procesos ecosistémicos clave, del sistema socioecológico como la protección del suelo (Belnap *et al.*, 2014; Chamizo *et al.*, 2020; Rodríguez-Caballero *et al.*, 2012), la biodiversidad de microorganismos (Bowker *et al.*, 2010) y la regulación del ecosistema, a través de su participación en los ciclos biogeoquímicos y del agua (Concostrina-Zubiri *et al.*, 2017; Rodríguez-Caballero *et al.*, 2018). Las biocostras son altamente resistentes a las altas temperaturas y la alta incidencia de la radiación solar, sus adaptaciones metabólicas y morfológicas les protege ante estas condiciones de alto estrés. Sin embargo las biocostras son vulnerables a la erosión hídrica y al pisoteo por la ganadería (Belnap *et al.*, 2003), una de las principales actividades socio-económicas en las zonas áridas. Tan solo en México las zonas áridas cubren más de la mitad del territorio, donde la ganadería extensiva contribuye sustancialmente a procesos de degradación, lo que conlleva a la erosión y pérdida de suelo y de la productividad ecosistémica, generando emisiones de polvo, y a largo plazo escenarios de desertificación, derivando en impactos negativos en el bienestar humano principalmente de las personas cuyos modos de vida dependen estrechamente de los recursos de las zonas áridas (Briones *et al.*, 2018; FAO, 2015).

La mayoría de los estudios de biocostra se encuentran dirigidos al funcionamiento físico (morfología), químico (metabolitos de importancia) y molecular (composición de la biocostra) en el ecosistema, por lo que abordar la biocostra desde un enfoque socio-ecológico, permite reconocer su influencia en los servicios ecosistémicos y en su interacción con el ser humano. En los últimos 10 años, se ha estudiado con mayor frecuencia la aplicación de la biocostra para la rehabilitación de los servicios ecosistémicos (Antoninka *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2016), así como estrategias de conservación y manejo sostenible de tierras áridas para reducir su vulnerabilidad por actividades como la ganadería (Belnap *et al.*, 2003, 2016; López-Rodríguez *et al.*, 2020). Además se han desarrollado diferentes métodos enfocados a la producción de inóculos de cianobacterias a gran escala generando nuevas opciones de restauración para las zonas áridas (Bowker *et al.*, 2019; Giraldo-Silva *et al.*, 2020). El cultivo de biocostras *ex situ*, es una estrategia que no solo acelera la

recuperación de biocostra, sino que explora diferentes condiciones de desarrollo de biocostra, las cuáles buscan reducir esfuerzos para el riego y tiempo, así como su aplicación con los responsables de las tierras (Nelson et al., 2020; Velasco Ayuso et al., 2017).

En la restauración de sistemas socio-ecológicos de las zonas áridas, donde la biocostra juega un papel importante, es necesario vincular diversos actores públicos y locales estrechamente vinculados, a fin de desarrollar colectivamente mecanismos de prevención y mitigación ante los daños que enfrente el sistema socioecológico, así como contribuir también colectivamente al diseño, desarrollo e implementación de planes de acción contra la erosión y la desertificación (Antoninka et al., 2020; Chock et al., 2019). En estudios recientes, se propuso reconocer a la biocostra como un elemento importante de las zonas áridas, a fin de incentivar el dialogo entre diferentes actores y sectores (público y privado) para comprender su funcionamiento en el sistema socioecológico, y reducir los desafíos de comunicación entre la ciencia y el sector gubernamental, a fin de generar nuevas estrategias de manejo y conservación de las zonas áridas (Ellison, 2016; Maggioli et al., 2021).

La Reserva de la Biosfera de Mapimí (RBM) fue creada en el año 2000 para llevar a cabo el manejo, la conservación y protección de la diversidad de flora y fauna, así como el desarrollo de investigación científica. Sin embargo, la regulación del manejo y la administración, es realizada por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y a través del Programa de Conservación y Manejo de la Reserva de la Biosfera, se gestionan distintas acciones entre las que se encuentran, la ganadería, el turismo, la cultura, el conocimiento local, la conservación y la restauración, entre otras (CONANP, 2006).

En el Ejido “La Flor”, existe una población de 9 personas, 3 mujeres y 6 hombres. Su población forma parte del pueblo de Ceballos con un área de 23 000 ha, a 20 km dentro del municipio de Mapimí, en el estado de Durango, con 3 730 habitantes (INEGI, 2000). Desde el siglo XIX, la ganadería extensiva ha sido una actividad económica significativa en toda la RBM. Sin embargo, a comienzos del siglo XXI, se iniciaron programas de ecoturismo y conservación en colaboración con asociaciones civiles y gubernamentales, como PRONATURA Noreste y CONANP. Las actividades dirigidas a la conservación, la ganadería y el ecoturismo en el Ejido “La Flor” se han ido integrando de manera transdisciplinaria, abarcando funciones ecológicas, sociales, culturales y económicas,

contribuyendo a los servicios ecosistémicos. En los últimos 10 años, estas actividades se han diversificado. En 2004, los habitantes locales, en colaboración con la CONANP, participaron en talleres de educación ambiental y manejo ganadero, creando pastizales y reduciendo el número de cabezas de ganado. En 2006, se implementó el ecoturismo, mejorando los ingresos económicos y reduciendo la actividad ganadera de aproximadamente 700 a 300 cabezas. En 2009, se implementaron estrategias de conservación y se creó la primera zona de exclusión ganadera para conservar la tortuga del Bolsón (*Gopherus flavomarginatus*) en un área aproximada de 60 hectáreas sin intensidad de pastoreo. Las colaboraciones entre los habitantes locales y la CONANP han consolidado el conocimiento sobre los proyectos de restauración y conservación, fortalecido la identidad cultural y mejorado las funciones del suelo, la biocostra, la vegetación y la ganadería (Monterrubio, 2020).

La unidad de paisaje conocida como “La Lengua” o “Los Altos” es una zona afectada continuamente por inundaciones ocasionales debido a sus altos escurrimientos, favoreciendo el desarrollo de plantas anuales, las cuales sirven como fuente de alimento para el ganado. Sin embargo, la disponibilidad de agua suele ser una limitante en las medidas de gestión que proponen diferentes actores (pobladores, CONANP y PRONATURA) sobre la influencia de la vegetación, el ganado, el suelo y su biocostra, en la funcionalidad del paisaje, ya que de este dependen los flujos de materia y energía en todo el SSE (Eldridge *et al.*, 2021). En este sentido, las condiciones actuales e históricas de las zonas con intensidades de pastoreo, fueron examinadas por Monterrubio, (2020), quien reconoció participativamente con los pobladores del ejido, la CONANP y PRONATURA, la respuesta socioecohidrológica de estas zonas, en las que la biocostra desempeña un rol muy importante, principalmente en la regulación de la disponibilidad del agua (Rodríguez-Caballero *et al.*, 2018), la estabilidad de estructura del suelo y la protección ante eventos erosivos de forma eólica e hídrica (Chamizo *et al.*, 2018; Faist *et al.*, 2017, 2020; Wei *et al.*, 2015).

El Ejido “La Flor” en la RBM es un sistema socio-ecológico (SSE) donde los humanos y la naturaleza han co-evolucionado para contribuir a su estructura, regulación y funcionalidad. Esto se basa en las características biofísicas del suelo, la cobertura vegetal y la diversidad de especies que fomentan la productividad, permitiendo así la conservación y gestión de los bienes y servicios ecosistémicos (Tongway & Hindley, 2004). Por lo que organismos clave como las biocostras, juegan un papel esencial en esta interacción con el humano. No

obstante, las actividades humanas ponen a disposición el uso de la tierra y sus recursos, generando conocimiento local importante sobre el manejo del ganado y su relación con el suelo, la composición de la vegetación y la influencia de la biocostra en cada una de las actividades socioeconómicas, como la ganadería, el ecoturismo y la conservación. Esta última, influenciada por la colaboración entre organizaciones del gobierno a través de organizaciones civiles como la CONANP y la PRONATURA, permitiendo a los pobladores participar en proyectos de restauración y conservación para salvaguardar a la RBM. Sin embargo, un factor importante que prevalece en todas las medidas de gestión que proponen las distintas organizaciones civiles, gubernamentales y la población local, es el agua ya que de este dependen los flujos de materia y energía en todo el SSE. Monterrubio (2020), determinó mediante investigación participativa, la función socioecohidrológica de la biocostra en el ejido “La Flor” cogenerando un conocimiento integrado entre los diferentes actores (pobladores, CONANP y PRONATURA) sobre la influencia de la vegetación, el ganado y el suelo en las actividades socioeconómicas importantes, como la ganadería, la conservación y el ecoturismo. Sin embargo, la necesidad de integrar a la biocostra como un componente esencial en los servicios ecosistémicos de regulación, soporte, aprovisionamiento y culturales, así como abordar nuevos enfoques para comunicar las funciones de la biocostra, incluyendo los resultados de su recuperación en sitios degradados, a los diferentes actores del sistema socioecológico, sigue siendo un área novedosa de investigación, no solo en el área de estudio del ejido “La Flor”, sino en la mayor parte de las zonas áridas (Maggioli et al., 2021; Rodríguez-Caballero et al., 2018); lo que permite nuevos espacios de investigación participativa, en donde se requieren procesos inter, multi y transdisciplinarios para su investigación.

El proceso de investigación participativa (IP), permite que los participantes colaboren estrechamente para identificar problemáticas reconociendo su experiencia y habilidades como recursos valiosos para la generación de conocimiento y así diseñar métodos de investigación que generen resultados para comprender de forma compleja las problemáticas identificadas. Por otra parte, la Investigación-Acción Participativa (IPA), promueve que las personas afectadas por los problemas participen tanto en su definición como en su solución a través de la acción social organizada (Borda, 1999; Cornwall & Jewkes, 1995). Una metodología para establecer marcos conceptuales de referencia y promover el dialogo entre diferentes actores y sectores y que además permite reconocer las diferencias interculturales, intersectoriales e interdisciplinarias, es el co-diseño de

intervenciones para el manejo, restauración y conservación. Eso promueve la colaboración activa de múltiples partes interesadas en el proceso de co-creación de un producto, servicio, sistema o espacio, integrando las perspectivas, conocimientos y experiencias, a diferencia de los enfoques tradicionales de diseño, donde los especialistas asumen la responsabilidad en tomar decisiones (Galvin *et al.*, 2016; Moll *et al.*, 2020; Romani *et al.*, 2022). En la última década los procesos de co-diseño de esquemas, diagramas e infografías para el mejoramiento de la comunicación y desarrollo de proyectos han resultado favorables para comprender las necesidades de cada uno de los participantes, a través de sus intereses y necesidades particulares (E. B.-N. Sanders & Stappers, 2008). Además, han demostrado ser útiles en la investigación, principalmente en estudios transdisciplinarios, ya que la conceptualización de redes de conocimiento para abordar diferentes desafíos ayudan a desarrollar la resiliencia en organizaciones colaborativas sometidas a cambios (Galvin *et al.*, 2016), y su aplicación es cada vez más evidente en poblaciones que experimentan un tipo de vulnerabilidad debido a las barreras sociales, económicas y del cambio ambiental global (Mauser *et al.*, 2013; Moll *et al.*, 2020).

El uso de infografías como un medio de comunicación favorece los procesos cognitivos y aumenta la participación de la audiencia, lo que promueve el diálogo, y el intercambio de ideas entre los actores participantes (Fernández & Lucas Barcia, 2022). Además, las infografías son una buena herramienta para facilitar la divulgación y comprensión de los resultados de investigación científica (Lazard & Atkinson, 2015; Teixeira, 2018), no obstante; se requiere desarrollar una serie de habilidades y técnicas que garanticen el proceso de comunicación efectiva y la comprensión (McGarvey & Mason, 2015). Así, el proceso de co-diseño de infografías con los miembros locales del ejido “La Flor” de la RBM, a partir de la recopilación de conocimiento local y científico mediante la investigación-acción-participativa, permite potencialmente identificar acciones e intereses que vinculen a la biocostra como un elemento clave del sistema socioecológico, reconociendo las necesidades e intereses de todos los actores. En esta exploración, se buscó responder ¿Cómo se puede integrar el conocimiento local sobre las biocostras en el co-diseño de infografías informativas? y ¿cómo puede el co-diseño de infografías facilitar una mejor comprensión del papel funcional de la biocostra en el ejido “La Flor” en la RBM, ¿desde una perspectiva socio ecológica?

2.2 Hipótesis

La participación de la comunidad local en el proceso de co-diseño de infografías sobre la biocostra en zonas áridas, promueve el reconocimiento del papel funcional de la biocostra en la protección del suelo y del ecosistema, promoviendo prácticas de uso sostenibles y facilitando los procesos de comunicación entre diferentes actores, considerando la biocostra como elemento clave del sistema socioecológico (SSE).

2.3 Objetivo general

Co-diseñar una serie de infografías entre grupos locales del ejido “La Flor” y la academia, para destacar los servicios ecosistémicos que la biocostra proporciona al SSE, vinculando las actividades socioeconómicas prioritarias del ejido, como la ganadería, la conservación y el ecoturismo.

2.4 Objetivo específico

Co-diseñar infografías para concientizar y divulgar sobre el funcionamiento e influencia de la biocostra en el SSE, con la participación de grupos locales (pobladores y organizaciones civiles) y académicos.

2.5 Metodología.

2.5.1 Diagnóstico participativo

Se realizó una visita de reconocimiento al Ejido “La Flor” en el año 2021, a fin de conocer y compartir experiencias, percepciones, necesidades actuales y conocimiento por parte de los miembros de la población local del Ejido “La Flor”, identificando desafíos para las actividades económicas, principalmente en el manejo ganadero y en el uso de recursos materiales para incursionar en las actividades del ecoturismo, a fin de divulgar el rol que desempeña la biocostra en el sistema socioecológico, integrando el trabajo artístico de uno de los miembros de la población local del ejido (Tabla 1).

Tabla 1. Miembros de la población local del Ejido “La Flor”.

<i>Actores participantes</i>	<i>Integrantes</i>	<i>Ocupación</i>	<i>Rol en el co-diseño</i>
Miembros de la población local del Ejido “La Flor”	Pobladores	Ganadería	Conocimiento local
		Ganadería y hogar	Evaluadores
		Promoción artística y difusión del ecoturismo	Representantes clave
		Administración de ecoturismo	Evaluadores
Organismos civiles	CONANP	Organización Civil	Evaluadores
	PRONATURA	Organización Civil	

Durante la estancia se reunió con los miembros interesados de la población local del Ejido “La Flor” y se propuso llevar a cabo un proceso de co-diseño de infografías vía electrónica y a distancia, en consideración a la pandemia del SARS-CoV2 y a la disponibilidad de los recursos de comunicación (acceso a internet, telefonía y/o equipo de cómputo). Voluntariamente dos miembros de la población se propusieron como “representantes clave” (Tabla 1), con los cuáles se mantendría la comunicación directa y a su vez, mantendrían la comunicación con el resto de los participantes de la población local, las organizaciones civiles y con el facilitador-diseñador. El canal de comunicación se acordó vía mensajería instantánea (WhatsApp) y de ser necesario, por videollamada en alguna otra plataforma. Durante la visita, se acordó recopilar los temas de interés que se desean cubrir en las actividades ecoturísticas, a fin de informar, y contribuir con las actividades de educación ambiental que se llevan a cabo.

En octubre de 2022 se tuvo una reunión virtual con los pobladores del ejido cuyos objetivos principales fueron: identificar los temas de interés para el co-diseño de infografías en donde la biocostra desempeña un rol importante en el ecosistema; distribuir la función y roles para

cada miembro participante en el proceso de co-diseño de infografías; y planear el proceso de co-diseño y evaluación de infografías.

1. Identificación de temas de interés.

Se aplicó una lluvia de ideas (FAO, 2003) en la que, de forma individual, los integrantes de la población propusieron elementos clave vinculados con la biocostra, como el agua, el ganado, la vegetación, el derecho a la tierra, la disponibilidad de nutrientes, el turismo, la flora y fauna, la identidad cultural, las acciones de conservación y los cambios en el patrón del clima; los cuáles a su vez, se vinculan con las actividades económicas prioritarias en el ejido: la ganadería, la conservación y el ecoturismo. Posteriormente se agruparon en las categorías de soporte, regulación, aprovisionamiento y culturales, tomando como base la literatura sobre las funciones ecológicas de la biocostra en los sistemas socio ecológicos (Concostrina-Zubiri et al., 2017; Kadykalo et al., 2019; López-Rodríguez et al., 2020; Rodríguez-Caballero et al., 2018), con la finalidad de presentar una mayor estructura en la información generada. Y se pidió a los participantes clasificar en orden de importancia los elementos clave que forman parte de sus intereses y necesidades.

2. Roles y funciones de participación en el proceso de co-diseño.

El establecimiento de roles y funciones para cada uno de los miembros participantes en el co-diseño de infografías, se realizó considerando la disposición de acercamiento entre cada uno de ellos, de forma que de ser necesaria la interacción física, se realizara sin inconvenientes. La función del diseñador consistió en la elaboración de bocetos de infografías empleando la información recabada en estudios previos, así como la selección de temas de interés identificada. Durante el co-diseño, el diseñador se desempeñó como facilitador, moderando el proceso de comunicación con los representantes clave del ejido, quienes, a su vez, mantuvieron la comunicación con los demás miembros de la población local del ejido y los representantes de las organizaciones civiles (CONANP y PRONATURA) (Tabla 1) a fin de revisar la integración de la biocostra en los temas de interés acordados.

3. Co-diseño de infografías.

Con base a la identificación y clasificación de los temas de interés para el co-diseño de infografías, los participantes expresaron preguntas de interés para la realización de las infografías. Posteriormente se definió un propósito de comunicación, el cuál representaría cada una de las infografías. El diseño de infografías se realizó dirigidas a un público en general, en los siguientes temas:

1. Pregunta de interés: ¿Qué es la biocostra y cómo funciona en el ecosistema?
Tema central: Funcionamiento de la biocostra en el desierto.
Propósito: Explicar el papel que representa la biocostra en la fertilidad y estabilidad del suelo, así como su composición microbiana.
Las características de diseño para esta infografía se propusieron a tamaño 160 x 60 cm, a fin de servir como material de apoyo en las actividades ecoturísticas, museo y talleres de exhibición de biocostras.
2. Pregunta de interés: ¿Cómo se relaciona la biocostra con la ganadería, el ecoturismo y la conservación?
Tema central: Influencia de la biocostra en las actividades económicas del Ejido “La Flor”.
Propósito: Informar las actividades económicas importantes dentro del Ejido “La Flor”, en los cuáles existe una mayor interacción con la biocostra, promoviendo bienes y servicios, así como la vulnerabilidad de la biocostra en estas actividades.
Esta infografía se propuso co-diseñar en un tamaño 21 x 14 cm, a fin de repartir a los visitantes y promover la divulgación de la biocostra.
3. Pregunta de interés: ¿Cómo se relaciona la biocostra y el agua?
Tema central: Relación existente entre biocostra y el agua.
Propósito: Divulgar al turista la influencia de la biocostra durante las temporadas de lluvia y de sequía, destacando el contraste entre ambas.
Esta infografía se propuso co-diseñar en un tamaño 21 x 14 cm, a fin de repartir a los visitantes y exponer el contraste de cambio en el desierto, ya que el turismo ocurre en ambas temporadas y los visitantes no siempre perciben estas transformaciones.

Los recursos ilustrativos para el co-diseño de infografías se realizaron con fotografías tomadas durante la visita de reconocimiento, en la cual se mostraron algunos dibujos realizados por uno de los integrantes de la población local, el cuál realiza trabajos de difusión artística para el ecoturismo del ejido (Tabla 1). Los dibujos y fotografías tomadas fueron procesadas empleando Adobe Photoshop e Illustrator CC (2020). El uso de fuentes de letra e ilustraciones se obtuvieron de sitios web de descarga libre y sin derechos de autor.

2.5.2 Proceso de Co-diseño

Para el logro de las infografías co-diseñadas, se establecieron en conjunto tres etapas importantes:

- I. Recopilación del conocimiento socio-ecohidrológico de la biocostra previamente co-generado
- II. Co-diseño y co-evaluación interna de infografías
- III. Presentación y entrega de infografías

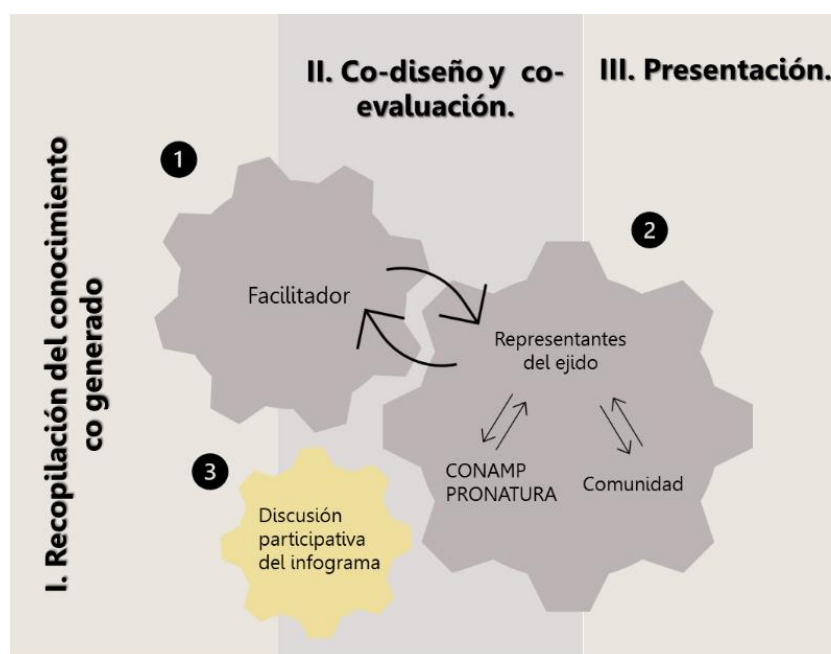


Fig. 17. Etapas del co-diseño de infografía.

Durante las etapas del proceso de co-diseño, los roles de los participantes se desempeñaron de forma articulada. El diseñador y facilitador mantuvo comunicación directa con los representantes clave del ejido, los cuáles a su vez informaban y revisaban en

conjunto con los demás miembros de la comunidad y los representantes de la organización civil (CONANP y PRONATURA). La retroalimentación entre representantes del ejido “La Flor” y el facilitador, permaneció en todas las etapas del co-diseño (Fig. 17).

Etapas 1. Recopilación del conocimiento socio-ecohidrológico de la biocostra previamente co-generado.

La información correspondiente a los temas de interés identificados en el diagnóstico participativo, se obtuvieron mediante la investigación participativa realizada previamente por Monterrubio (2020), en la que se obtuvo un conocimiento local integrado entre diferentes actores, a fin de examinar participativamente la respuesta socioecohidrológica de la biocostra en un sitio con alta intensidad de pastoreo, se recopiló información basada en las siguientes preguntas: ¿cómo contribuye la biocostra en la regulación hídrica en el SSE?, ¿cómo perciben y valoran las comunidades locales la importancia de la biocostra en su entorno?, ¿cuáles características morfológicas de la biocostra influyen en el soporte y regulación del SSE?, ¿cómo cambia la estructura de la biocostra en temporada de lluvias y secas?, ¿qué microorganismos predominan en la biocostra y cómo contribuyen a su morfología?, ¿cómo influye la presencia de biocostra en la provisión de servicios ecosistémicos como la fertilidad del suelo y la retención de agua?, ¿qué beneficios económicos y culturales aporta la biocostra a las comunidades humanas dentro del SSE?, ¿cómo influye la biocostra en la ganadería, la conservación y el ecoturismo? y ¿cuáles son las amenazas continuas a la biocostra que generan las actividades económicas? La información obtenida con base a las preguntas anteriores fue imprescindible para el co-diseño de las infografías y para integrar la biocostra con los elementos clave del SSE, las necesidades de la población local, los servicios ecosistémicos y el conocimiento entre los diferentes actores. De esta forma, la información recopilada se categorizó en los siguientes temas:

1. Función socioecohidrológica de la biocostra.
2. Caracterización morfológica de la biocostra
3. Influencia de la biocostra en los bienes y servicios del SSE

Etapas 2. Co-diseño y co-evaluación interna de la infografía.

El proceso de co-evaluación consistió en la construcción y aplicación de dos cuestionarios elaborados en conjunto; uno de uso interno (Tabla A 1), en el que los participantes del co-

diseño de infografías, co-evaluamos la estructura, lenguaje apropiado, integración temática, diseño visual, comunicación y propósito. Mientras que el cuestionario externo (Tabla A 2) fue dirigido a un público general, el cual se respondió desde una perspectiva de turista evaluando la claridad de la información, así como como el funcionamiento que desarrolla la biocostra en el sistema socioecológico.

El co-diseño de infografías se llevó a cabo con base a los criterios de co-diseño que integran la infografía, como la estructura, temas de interés, objetivos, recursos gráficos y designación de roles (Moll *et al.*, 2020; Sanders, 2005; Sanders & Stappers, 2008). La duración del proceso de co-diseño tuvo una duración de cinco meses. Inicialmente el diseñador generó una primera versión de las infografías, con base a los temas de interés identificados en el diagnóstico participativo, incluyendo el conocimiento socio-eco hidrológico de la biocostra previamente co-generado en la etapa 1.

Los diseños elaborados durante la primera y segunda versión fueron compilados en PDF y se pusieron a disposición vía electrónica mediante mensajería instantánea (WhatsApp) a los representantes del ejido, junto con un cuestionario de evaluación interna (miembros participantes del co-diseño) (Tabla 1), en el que se establecen los criterios de comunicación gráfica y confiabilidad, los cuáles evalúan elementos clave que determinan la calidad de la infografía, por ejemplo, el formato, la estructura, la calidad de las imágenes, así como la información y la accesibilidad al lenguaje con la que se expresa el conocimiento en la infografía (Cedillo *et al.*, 2017).

Los representantes clave del ejido, compartieron y co-evaluaron con los miembros de la comunidad local restante y los representantes de las organizaciones civiles (CONANP y PRONATURA) el cuestionario de evaluación interna (Tabla 1). En noviembre de 2021, se realizó una llamada telefónica con los representantes clave del ejido para obtener retroalimentación sobre la primera co-evaluación de las infografías. Durante esta sesión, se registraron las observaciones recibidas, las cuales se utilizaron para desarrollar una segunda versión. Tras finalizar esta segunda versión, se llevó a cabo una nueva co-evaluación con los miembros participantes del ejido. En enero de 2022, se realizó una llamada telefónica con los representantes del ejido, obteniendo retroalimentación favorable sobre las segundas versiones de las infografías.

Etapas 3. Implementación y Evaluación externa de infografías.

Con base a la co-elaboración del cuestionario externo (Tabla A 2), las infografías concluidas fueron evaluadas externamente por el público en general mediante un cuestionario en Google Forms, el cual se compartió electrónicamente con todos los participantes del co-diseño para su evaluación por el público en general. Las infografías co-diseñadas se enviaron electrónicamente a los representantes clave para su difusión. Actualmente, se espera que los miembros locales exhiban cada una de las infografías en formato físico, utilizándolas en actividades de educación ambiental, como talleres, charlas a grupos de turistas, y para la información documental expuesta en el museo del Ejido “La Flor”, dentro de la RBM. Las infografías incluyen un código QR en el cual los turistas, podrán acceder a una encuesta abierta, la cual proveerá de información a la población local, sobre el uso, comunicación y difusión de la información presente en las infografías, además de ser de utilidad para los grupos locales y algunas organizaciones que gestionan el ecoturismo.

Los resultados obtenidos de los cuestionarios de evaluación (Tabla A 1 y 3), se analizaron empleando estadística descriptiva, generando tablas de frecuencia y graficas de proporción, para describir diferentes categorías pertenecientes a un mismo conjunto de datos, posteriormente los resultados de la evaluación se comunicaron a los participantes del proceso de co-diseño.

2.6 Resultados y discusión

2.6.1 Recopilación del conocimiento co-generado en estudios anteriores

Con base a la investigación participativa de la función socioecohidrológica de la biocostra realizada con 7 integrantes del ejido “La Flor” (Monterrubio, 2020), se obtuvo que, dependiendo de las condiciones del pastoreo extensivo de ganado, la influencia de la biocostra en procesos ecohidrológicos era distinta. Mientras que, el funcionamiento de la biocostra se desconocía para los miembros de la población local, atribuyendo su funcionamiento a otros elementos de los agostaderos como la vegetación o la fauna. Sin embargo, a través de los objetivos de la investigación participativa, los pobladores alcanzaron a comprender la funcionalidad socioecohidrológica de la biocostra.

Durante el diagnóstico participativo, se identificaron una serie de elementos clave en donde cada participante vinculó la biocostra con las actividades económicas prioritarias en el ejido, como la ganadería, la conservación y el ecoturismo. Posteriormente, se ordenaron según

la importancia en el valor económico, así como los intereses y objetivos de la población local.

Elementos clave identificados:

1. **Agua:** disponibilidad de agua de lluvia para su almacenamiento, distribución y uso en sus actividades cotidianas.
2. **Ganado:** población de animales, manejo y utilidad obtenida.
3. **Vegetación:** disponibilidad de forraje y sombra para el ganado
4. **Habitabilidad o propiedad de la tierra:** valor correspondiente al hábitat y derechos sobre las tierras de la población local en el ecosistema.
5. **Calidad del suelo:** disponibilidad de nutrientes para el desarrollo de vegetación, así como su estabilidad ante el fenómeno de la erosión.
6. **Turismo:** actividad económica diseñada para promover la educación ambiental.
7. **Recursos naturales:** aquellos elementos que se obtienen directamente del ecosistema y representan utilidad a la población local.
8. **Acciones para la conservación:** desarrollo de estrategias, para promover la conservación de especies endémicas, a fin de mantener el ecosistema.
9. **Identidad cultural:** apreciación y percepción de la belleza y la armonía del ecosistema.
10. **Cambio climático:** cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones del clima.

Los elementos clave fueron integrados a los servicios ecosistémicos en conjunto con el conocimiento socio-ecohidrológico de la biocostra previamente co-generado (Fig. 18). En donde se identificó la importancia del suelo y su biocostra, como elemento principal que vincula la ganadería, el ecoturismo y la conservación. Esta interacción permite que la estructura social, obtenga bienes y servicios dentro del SSE. Sin embargo, los grupos locales mencionaron la influencia del cambio climático, como un factor emergente que interfiere en el manejo de recursos para la conservación, la ganadería y el ecoturismo; ya que de acuerdo con los miembros del ejido, la variación atípica de la precipitación, ha generado una baja utilidad en sus ingresos, por lo que debe ser sujeto de estudio en las futuras investigaciones, a fin de conocer el manejo de las tierras y promover la mitigación de los efectos del cambio climático, desarrollando proyectos y fortaleciendo la toma de decisiones, principalmente en las estrategias de restauración y/o rehabilitación de zonas áridas (Fig. 18).

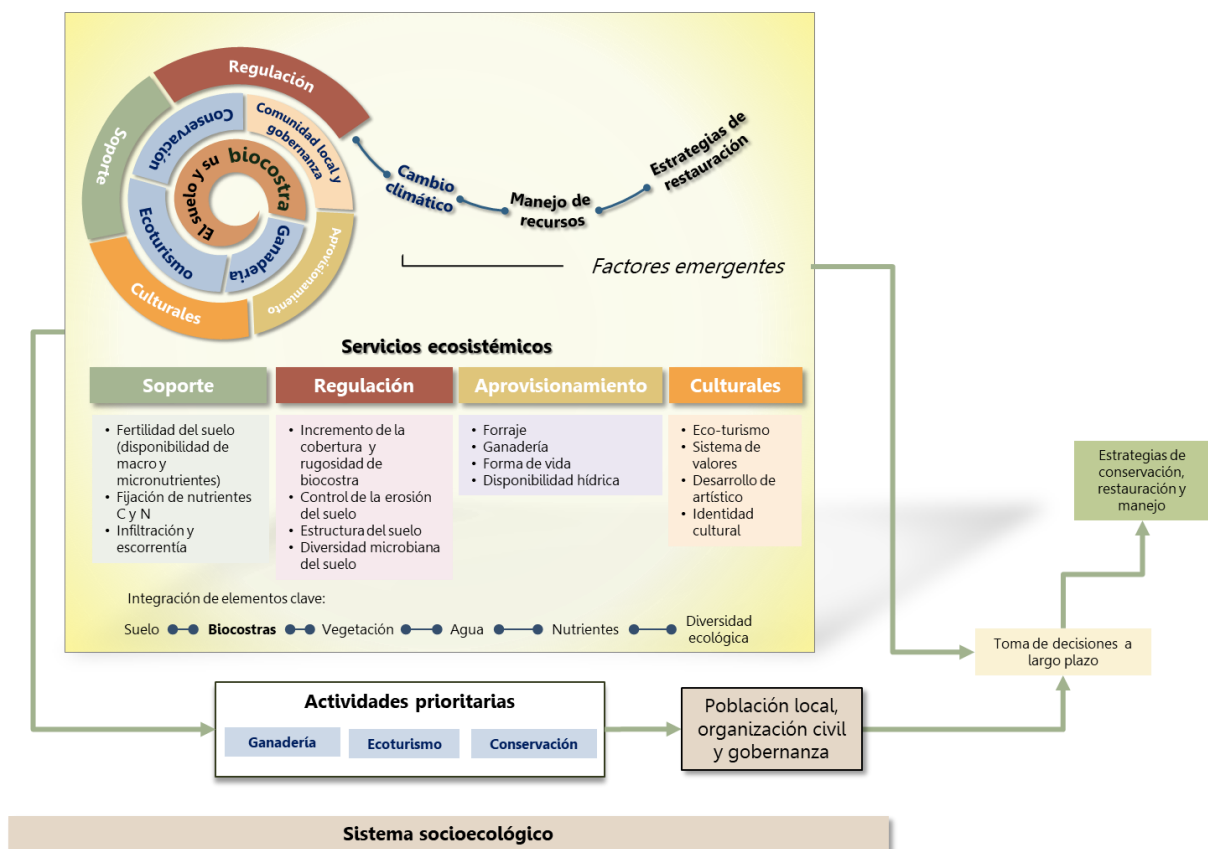


Fig. 18. Integración de los servicios ecosistémicos asociados a la biocostra.

Por otro lado, durante la visita al ejido y las reuniones virtuales de revisión, se encontró que para los miembros del ejido “La Flor”, la biocostra es un elemento del sistema que limita la cobertura de vegetación, debido a sus características físicas como su dureza y la uniformidad en el suelo (tortuosidad y rugosidad). Aunque han constatado que ayuda a la protección del suelo evitando su erosión y la formación de tolvaneras, denominadas como ‘barreales’. Esta percepción, se encuentra vinculada a las características físicas de la biocostra y a las unidades de paisaje que presenta la reserva. Sin embargo, el desarrollo de la biocostra depende de diferentes condiciones del ecosistema como el tipo de suelo, clima, topografía, etc. (Weber *et al.*, 2022). En la unidad de paisaje denominada “Los Altos” o “La Lengua”, en la que se encuentran los sitios de estudio, uno con mayor intensidad de ganado y otro en ausencia de la ganadería (Fig. 2), se ha considerado que la cobertura de vegetación es menor comparada con otras unidades de paisaje de la RBM; sin embargo, la intensidad del ganado y su historial de legado son una pieza clave en las funciones socioecohidrológicas (Monterrubio, 2020), y por lo tanto en los procesos de recuperación de biocostra, las cuáles se recuperaron después de ser inoculadas en el suelo perturbado,

de forma diferente, según el sitio de origen (conservado, perturbado), las condiciones de riego y el tiempo de inoculación (capítulo 1).

2.6.2 Co-diseño de infografías: una estrategia integral para el reconocimiento de la función de la biocostra en el sistema socioecológico.

Los acercamientos del estudio de la biocostra desde una perspectiva socio ecológica continúan siendo pocos y hablar sobre los servicios ecosistémicos que provee, no ha sido un enfoque de estudio ampliamente explorado, ya que por lo regular se estudia solo la influencia de la biocostra en su sistema natural (ecosistema) (López-Rodríguez et al., 2020), sin abordar sus relaciones con elementos humanos del sistema, lo que permite establecer el sistema socioecológico, ya que además de coexistir con el ser humano, le confiere estructura y funcionalidad al sistema (Berkes et al., 2000; Challenger & Clegg, 2011). Sin embargo, estudiar de manera conjunta su funcionamiento biofísico y socio ecológico, permite representar de manera integral su relación con los elementos del sistema socioecológico, desde sus funciones, hasta su influencia en los beneficios que recibe la comunidad local, como la ganadería, la conservación y el ecoturismo. Adicionalmente, representa una poderosa herramienta de comunicación para la toma de decisiones entre los diferentes actores (Abson et al., 2014; Kadykalo et al., 2019; López-Rodríguez et al., 2020). Actualmente aplicar un enfoque socio ecológico en las futuras investigaciones sobre la biocostra, es una vía de investigación emergente, la cual busca comunicar la influencia de la biocostra en los servicios ecosistémicos a los distintos actores del gobierno y la sociedad, así como promover evidencias que apoyen acciones de conservación en las comunidades de todas las zonas áridas (López-Rodríguez et al., 2020; Maggioli et al., 2021). Además abordar el estudio de la biocostra y su relación con los servicios ecosistémicos, es un ejemplo del cambio de paradigma de servicios ambientales a servicios ecosistémicos (Silva-Gómez et al., 2015) . Por lo que estudiar a la biocostra en este enfoque promueve una gestión más holística en las zonas áridas y semiáridas, generando la apropiación y el reconocimiento cultural y estético por parte de la población local (Rodríguez-Caballero et al., 2018); además de ser necesario para incentivar los procesos de restauración en las zonas áridas (Antoninka et al., 2020; Bowker, 2007).

Por consiguiente, el co-diseño de infografías es una estrategia de comunicación que permitió conjuntar el conocimiento local y la divulgación del funcionamiento de la biocostra en el ecosistema, en las actividades ecoturísticas que se imparten.

El proceso de co-diseño, es un proceso integral y participativo que permite vincular todas las partes que integran el contexto o situación de estudio, involucrando elementos humanos y no humanos, para fomentar el desarrollo de ideas colaborativas y reducir la tendencia al antropocentrismo (Romani *et al.*, 2022). Por lo que mejorar la comunicación entre actores, permitirá que elementos relevantes del SSE como las biocostras, sean consideradas dentro del ecosistema. El co-diseño que articula elementos humanos y no humanos, permite crear redes más democráticas y relaciones sin importar la jerarquía entre los diferentes actores y, en consecuencia, reflexionar sobre los diferentes intereses humanos, como el ecoturismo y la ganadería; y no humanos, como el cuidado y conservación de la biocostra (Rice, 2018).

En la última década, el proceso *per se* del co-diseño, ha sido un enfoque de investigación para el desarrollo de servicios de información en múltiples disciplinas, dirigido a resolver un problema o desafío particular, a partir del intercambio de ideas, necesidades, creencias, capacidades y creatividad de los miembros participantes que representan el problema de estudio (Moll *et al.*, 2020). El intercambio de experiencias, conocimientos y necesidades de los participantes, hacen que el proceso de co-diseño de cualquier estrategia o actividad, genere herramientas de comunicación entre diferentes sectores como la población local y el sector gubernamental, facilitando la reflexión y la discusión en la toma de decisiones, correspondientes al problema de estudio (Schouten *et al.*, 2022).

De esta manera, el co-diseño de infografías de la biocostra y sus funciones, permitió recopilar diversas perspectivas de los miembros participantes del sistema socio ecológico, desde los distintos ángulos y necesidades, enriqueciendo su comprensión. Los participantes en el co-diseño de infografías, y adicionalmente con los resultados obtenidos de la recuperación de biocostra en el capítulo 1, y la información socioecohidrología realizada previamente, proporcionaron la información necesaria para comprender contextualmente los efectos de la biocostra en el ecosistema, principalmente en suelos con y sin biocostra, y su interacción con la ganadería (Fig. 20), y el agua (Fig. 21). Además, destacó el trabajo artístico por parte de un miembro representante del ejido, cuyo trabajo se colocó en las infografías a fin de mantener una visión cultural del desierto en su *modus vivendi*, lo que mantiene la apropiación y el sentido cultural de los elementos del ecosistema en la comunidad del ejido “La Flor” (Fig. 22).

EL DESIERTO Y SUS Biocostras

¿QUÉ SON LAS BIOCOSTRAS?

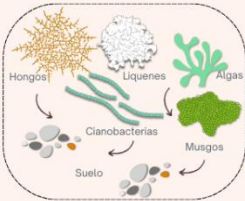
El desierto de la Reserva de la Biosfera de Mapimí, alberga una gran variedad de especies de flora y fauna, historia y paisajes únicos, debido a su formación geológica. La riqueza de organismos, se ha adaptado a través del tiempo, ante la escasez de recursos y la variabilidad climática. En el suelo, existen pequeñas **biocostras** compuestas por hongos, líquenes, cianobacterias, algas y musgos. Estos organismos contribuyen positivamente en la regulación del ecosistema, ya que son altamente resistentes a las temperaturas y sequías; sin embargo, son vulnerables al pisoteo del ganado.

bacterias
cianobacterias
algas
hongos
musgos
líquenes



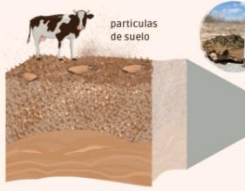

Foto: Eduardo Flor, Reserva de la Biosfera de Mapimí

¿CÓMO FUNCIONAN LAS BIOCOSTRAS?



Los filamentos celulares de los hongos, algas y cianobacterias, junto con las rizinas de líquenes y musgos asocian las partículas del suelo, manteniendo estable la superficie del mismo.

Manteniendo estable la superficie y protegiéndolo ante la erosión, ya sea por lluvia, viento o el pisoteo del ganado.



partículas de suelo

biocostra

superficie del suelo

En suelos sin biocostra, la presencia de "barreales", es un problema que puede afectar la salud de las personas. Además aumenta la pérdida de suelo y disminuye la vegetación, poniendo en riesgo la ganadería, y afectando la economía.

La pérdida de suelo, es un problema en todo el mundo, ya que disminuye la productividad del ecosistema, propiciando la desertificación.



Barreales en sitios con baja cobertura de biocostra.

¿CÓMO INFLUYE LA BIOCOSTRAS EN EL FLUJO DE AGUA Y LA FERTILIDAD DEL SUELO?



La biocostra captura en la superficie rugosa sedimentos y semillas que se dispersan con el viento.



Las biocostras absorben el agua de lluvia, favoreciendo la germinación de las semillas y el arrastre de nutrientes al suelo, mejorando su fertilidad.



Los sedimentos retenidos en la superficie de la biocostra, son fuente de carbono y estimulan el crecimiento de las plantas.

¿QUIÉN ESTÁ EN LAS BIOCOSTRAS?

Algunos organismos como líquenes y musgos pueden identificarse a simple vista, mientras que otros, como las algas verdes, cianobacterias y microhongos requieren de métodos especiales para su identificación.



¿Un minuto? Escanea aquí.



CONAHCYT
IPICYT
DIRECCIÓN DE CIENCIAS AMBIENTALES

Fig. 19. 1er Producto del co-diseño. Funcionamiento de la biocostra en el desierto.

LA FLOR DEL DESIERTO.

El suelo en los desiertos es un recurso de gran importancia para la supervivencia de las plantas, la vida silvestre y las actividades humanas en estas regiones. Aunque pensemos que en el desierto no hay vida, al observar con detenimiento la superficie del suelo, nos encontraremos con una cubierta denominada **biocostra**, la cual sirve de protección ante la erosión, la captura de nutrientes al suelo y la germinación de semillas, entre otras funciones importantes que regulan el ecosistema.

En el ejido la Flor, dentro de la Reserva de la Biosfera de Mapimí, la **ganadería**, la **conservación** y el **ecoturismo**, son actividades económicas importantes. El **suelo y sus biocostras**, conforman la base para el desarrollo de estas actividades, es por ello que la colaboración con organizaciones como CONANP, PRONATURA e instituciones académicas como el IPICYT, promueven el desarrollo de propuestas para el mejoramiento y aprovechamiento de estas actividades.



Fig. 20. 2do producto de co-diseño. Influencia de la biocostra en las actividades económicas.

El desierto está vivo

... y las biocostras lo transforman con el agua.

En la superficie del suelo del desierto habita una comunidad diversa de organismos, denominada **biocostra**, la cuál protege al suelo de la erosión y regula el transporte de nutrientes del ecosistema.

Temporada de lluvia



“Con los pulsos grandes de agua, en temporada de lluvia, los musgos se desarrollan; sin embargo en temporada de secas, la temperatura y la falta de agua, inhibe su crecimiento.”



Los tejidos de las comunidades de las biocostras junto con las

partículas de suelo enriquecidas en materia orgánica, aprovechan los pulsos cortos de lluvia, que ocurren frecuentemente en los desiertos. Con esta humedad, muchos organismos de la biocostra fijan el dióxido de carbono de la atmósfera y empiezan a crecer. Algunas cianobacterias y líquenes también fijan el nitrógeno atmosférico y mediante este proceso aumentan la fertilidad del suelo.

Durante su metabolismo, las biocostras producen sustancias extracelulares encargadas de formar agregados del suelo, y pigmentos que regulan la temperatura y protegen a los organismos de la radiación UV.

Temporada de secas



En la biocostra, las cianobacterias destacan por su notable resistencia a las condiciones ambientales extremas, como las altas temperaturas y la poca disponibilidad del agua.

Su tolerancia la desecación, les permite sobrevivir en estas condiciones, reactivándose rápidamente con pequeños pulsos de agua. Además, presentan diferentes mecanismos para reparar su ADN dañado por el estrés ambiental, lo que les permite sobrevivir y recuperarse cuando las condiciones mejoran.

Estas adaptaciones permiten a las cianobacterias formar biocrustas en suelos desérticos, donde desempeñan un papel crucial en la estabilidad del suelo, la captura de nutrientes y la protección contra la erosión.

Ilustraciones:
Sergio Herrera

¿Un minuto?
Escanea aquí.



Fig. 21. 3er producto del co-diseño. Regulación hídrica de la biocostra.

El proceso de co-diseñar una forma de comunicación, como el de las infografías, producen soluciones y pedagogías innovadoras en el tema de estudio, promoviendo el dialogo entre las partes interesadas, ya que la diversidad de ideas generadas puede identificar funciones o elementos que no habían sido considerados inicialmente (Aksela, 2019). Por ejemplo, los miembros participantes, han considerado usar las infografías co-diseñadas, para la divulgación del funcionamiento de la biocostra en el desierto, como parte de las actividades de educación ambiental realizadas en el ecoturismo del ejido. Otro aspecto importante es el reconocimiento sobre la influencia de la biocostra y la estabilidad del suelo al comparar sitios con alta intensidad ganadera y sitios sin ganado. A través de los resultados obtenidos, los miembros del ejido comprendieron la función de los exopolísacaridos producidos por los microorganismos de la biocostra, los cuales adhieren las partículas del suelo y reducen la erosión y formación de “barreales”, protegiendo así sus tierras. Así mismo, el proceso participativo, buscó aprovechar las habilidades de cada uno de los miembros participantes, diseñando estrategias que se adapten a las necesidades y cambios futuros, no solo de los pobladores, sino también del sistema socioecológico, en diferentes niveles y escalas espacio-temporales (Blake *et al.*, 2021; Kensing & Blomberg, 1998).

El proceso de co-diseño es una filosofía y un método cuyo potencial es fortalecer, capacitar y habilitar a las partes interesadas (actores) en la colaboración efectiva, para la generación de soluciones inclusivas y relevantes, una toma de decisiones informada que genere un sentido de propiedad y un compromiso con los proyectos desarrollados.

2.6.3 Elaboración y evaluación del co-diseño de infografías.

Los resultados obtenidos a través del cuestionario interno realizados por los miembros del ejido fueron positivos para cada uno de los criterios de estructura, coherencia y claridad, lenguaje accesible, integración temática, diseño visual, comunicación y propósito. Mientras que en la evaluación externa, se tuvo una participación de 50 personas, en diferentes categorías: investigadores (4%), estudiantes (66%) y sector privado (10%), quienes evaluaron la claridad y legibilidad de la información presentada, así como la tipografía, tamaño de texto y color, obteniendo una evaluación “excelente” correspondiente al 40% del publico evaluador y un 55% como “bueno”. En el diseño visual, dirigido a la distribución del contenido y el uso de imágenes para mejorar la comprensión de la información, un 33.3% del publico evaluador calificó como “excelente”, 46.6% “bueno”, y 20% “suficiente”. En cuanto a la estructura, flujo de la información y adaptación al público, el 52% del publico evaluador calificó “buena”, el 38.6% como “suficiente” y el 20 % como “excelente”, solo un

4% mostró que la relación entre los conceptos y variables de estudio, no presentaron una relación directa. Este resultado de insuficiencia se obtuvo en la categoría de estudiantes. Sin embargo, en la sección de comentarios finales, el sector privado y los estudiantes, mencionaron no haber conocido del tema anteriormente, o reconocer la biocostra como un elemento del suelo en las zonas áridas principalmente (Fig. 19).

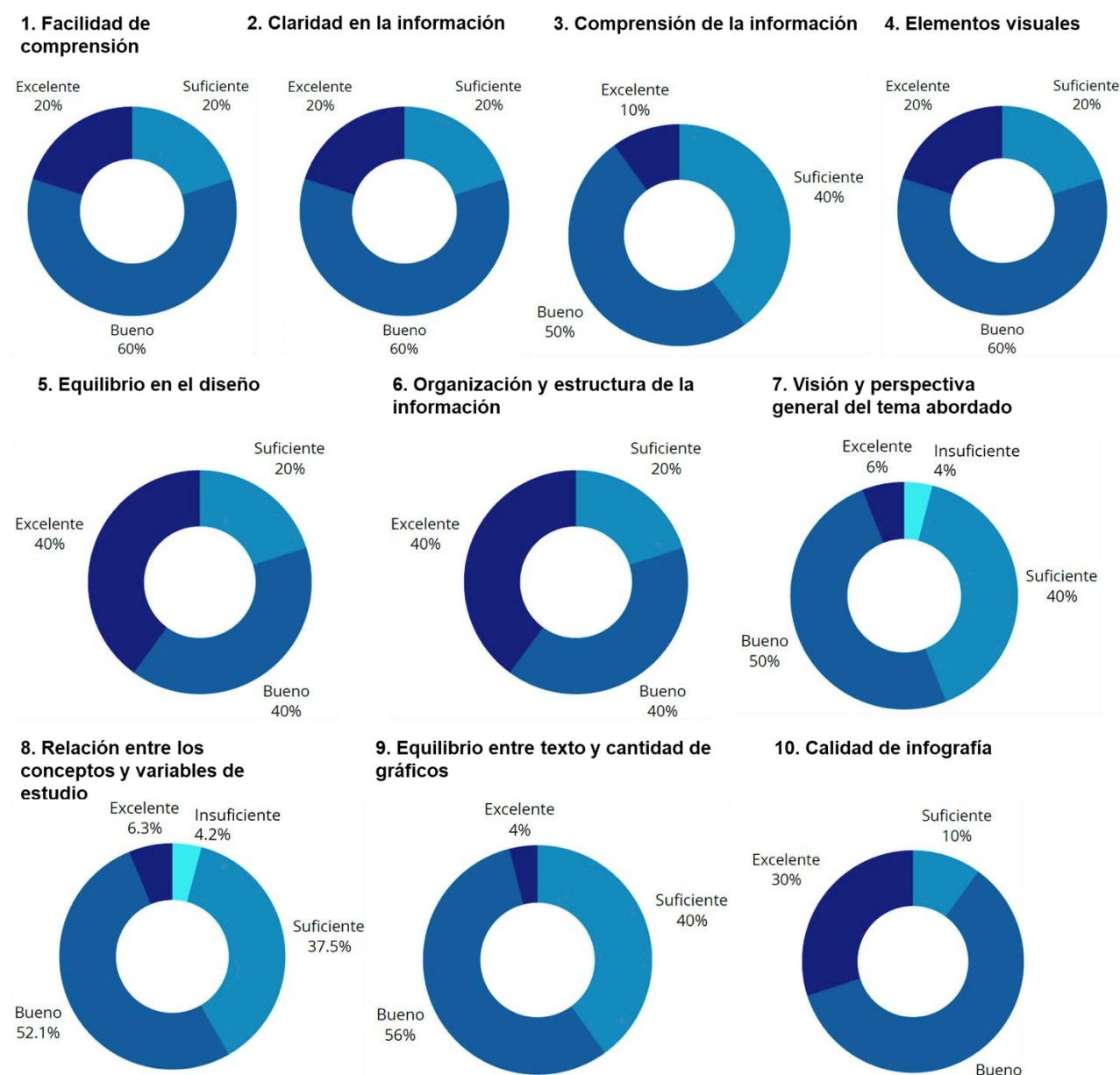


Fig. 22. Resultados de la evaluación de infografías. El cuestionario fue aplicado a una población de 50 personas (N=50).

Al igual que en otros temas de estudio, la comunicación desempeña un papel fundamental en el ámbito científico y está intrínsecamente relacionada con la divulgación de resultados

científicos, ya sea a través de medios tradicionales, redes sociales, charlas públicas o programas educativos, los cuáles requieren de material infográfico, de tal forma que la información obtenida sea accesible y comprensible para un público no especializado. En el caso del ejido de La Flor de la RBM, el co-diseño de infografías (Fig. 20; 22), tiene por objetivo ser de apoyo en las actividades de ecoturismo y educación ambiental que se realizan en el ejido, y de esta forma incidir en el público general, compartiendo información de la biocostra y funcionamiento en el ecosistema. Por otra parte, el desarrollo de una encuesta abierta realizada vía electrónica y dirigida al público, permite obtener datos y características sobre temas de mayor interés sobre el funcionamiento de la biocostra y su interacción en el sistema socioecológico, lo que favorece la divulgación y el enriquecimiento cultural de la biocostra. Además, le permite a la población local y otras organizaciones como la CONANP conocer la interacción del público con la biocostra, como parte de las actividades del ecoturismo, por lo que, a largo plazo, se espera obtener respuestas que impulsen la divulgación y el reconocimiento socioecológico y cultural de la biocostra.

2.7 Conclusión

El co-diseño de infografías sobre el funcionamiento de la biocostra en el sistema socioecológico, abordando aspectos como la protección del suelo contra la erosión por el viento y el pisoteo del ganado, la interacción con el agua y la fertilidad del suelo, y su influencia en las actividades económicas como la ganadería, el ecoturismo y la conservación, permitieron vincular la experiencia y el conocimiento de los grupos locales. Este último, obtenido previamente a partir de la investigación participativa, el cual obtuvo la influencia socio-ecohidrológica de la biocostra, y fue una pieza clave para poder reconocer el punto de partida en el co-diseño de infografías.

Durante la visita al Ejido “La Flor”, y el diagnóstico participativo realizado, se pudo identificar que los pobladores locales comprendían la importancia de la biocostra, principalmente en el control y prevención de la erosión del suelo, sin embargo; surgieron preguntas y temas de interés, por ejemplo, ¿quién está en las biocostras?, ¿cómo se relaciona la biocostra y los nutrientes del suelo?, ¿cómo logra la biocostra reducir la presencia de ‘barreales’ o tolveneras?, ¿cómo influye la biocostra en la ganadería, la conservación y el ecoturismo?; así como, explicar el cambio contrastante del paisaje del desierto, en temporada de lluvias y secas, ocasionando que los líquenes y musgos de las biocostras se hidraten y generen un cambio contrastante en su estructura, debido a su hidratación. En el diagnóstico participativo, se retomaron las preguntas anteriores y los miembros participantes propusieron elementos clave vinculados con la biocostra, destacando la importancia del agua, ya que, en los últimos años, se han presentado variaciones en la temporada de lluvias, lo que ha generado pérdidas en su ganado. De igual manera, estos elementos clave fueron esenciales para el inicio del co-diseño, ya que forma parte de la construcción no solo de las infografías, sino también del conocimiento co-generado a partir de la integración de elementos, funciones y servicios proporcionados por la biocostra al SSE, y por consiguiente a la comunidad local; además de complementar la investigación realizada anteriormente (Monterrubio, 2020).

El proceso de co-diseño de infografías, permitió que los grupos locales comprendieran mejor su relación con la biocostra, y su importancia en el SSE. De esta manera, los intereses y las preguntas sobre la biocostra y su función, mencionados anteriormente, fueron respondidos a partir del co-diseño de infografías. Reconociendo la composición microbiana de la biocostra, en la que participan distintos grupos de microorganismos, su

vulnerabilidad al pisoteo del ganado, su interacción con el agua, y la producción de sustancias extracelulares como los exopolisacáridos (EPS), los cuáles además de permitir la adherencia de las partículas de suelo y mejorar su estabilidad de estructura, les permite adaptarse y protegerse de la radiación y del cambio en su hidratación-desección. Por otra parte, el co-diseño de infografías logró combinar la información científica y el conocimiento local, esto incluye sus experiencias y percepciones sobre su entorno en el que coexisten con el suelo y su biocostra. Al incorporar estos elementos, las infografías no solo reflejan datos científicos y técnicos, sino también las perspectivas y el entendimiento cultural de los participantes locales, logrando así una representación relevante y útil, principalmente para las actividades de difusión y educación ambiental, las cuáles forman parte del ecoturismo. Además, las infografías en el contexto educativo pueden atraer a turistas interesados en la biodiversidad ecosistémica, estética y cultural a sitios como la RBM. En este punto, la comunidad local contribuye a la divulgación de la importancia de las biocostras, ampliando su visión sobre la conservación y la protección de otros entornos naturales. Así mismo, el co-diseño de infografías, generó una visión integral de las funciones de la biocostra en el sistema socioecológico, como el control de la erosión, la calidad del aire, y su influencia socioecohidrológica, a fin de generar su reconocimiento en las actividades socioeconómicas, culturales, de soporte y regulación.

Esta colaboración permitió sintetizar la complejidad del sistema en elementos gráficos accesibles, a un público general, comunicando el conocimiento científico y local a diversas audiencias, incluidas la comunidad científica, el público general, los responsables de políticas, y otros grupos interesados; haciendo la información accesible, relevante y comprensible sobre la importancia de las biocostras en las zonas áridas, como parte importante de las actividades socioeconómicas (ganadería, conservación y ecoturismo). Estas actividades requieren un constante desarrollo de nuevas estrategias, principalmente en el manejo, las cuáles requieren de un diálogo con mayor apertura que vinculen todos los elementos involucrados, incluyendo los humanos y no humanos como las biocostras, a fin de obtener beneficios para los miembros del ejido. Por otro lado, el conocimiento co-generado puede tener un impacto significativo en la toma de decisiones, permitiendo que un público más amplio, incluidos los grupos de interés, comprendan rápidamente la información de la que se esté mencionando. Al utilizar datos y hechos basados en investigación participativa, representados de manera visual y articulada. Las infografías proporcionan una base sólida para respaldar argumentos o decisiones. Esto puede

fortalecer la posición de los grupos interesados al presentar información clara y respaldada por evidencia científica ya que, al presentar información de manera visual y fácil de entender, pueden servir como punto de partida para discusiones constructivas que influyan en la toma de decisiones colaborativas, como la conservación de la biocostra y el manejo sustentable de tierras en zonas áridas.

3.0 Referencias

- Abed, R. M. M., Tamm, A., Hassenrück, C., Al-Rawahi, A. N., Rodríguez-Caballero, E., Fiedler, S., Maier, S., & Weber, B. (2019). Habitat-dependent composition of bacterial and fungal communities in biological soil crusts from Oman. *Scientific Reports*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42911-6>
- Abson, D. J., von Wehrden, H., Baumgärtner, S., Fischer, J., Hanspach, J., Härdtle, W., Heinrichs, H., Klein, A. M., Lang, D. J., Martens, P., & Walmsley, D. (2014). Ecosystem services as a boundary object for sustainability. *Ecological Economics*, 103, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.04.012>
- Aksela, M. (2019). Towards Student-Centred Solutions and Pedagogical Innovations in Science Education through Co-Design Approach within Design-Based Research. *LUMAT: International Journal on Math, Science and Technology Education*, 7(3), 113-139.
- Albalasmeh, A. A., Berhe, A. A., & Ghezzehei, T. A. (2013). A new method for rapid determination of carbohydrate and total carbon concentrations using UV spectrophotometry. *Carbohydrate Polymers*, 97(2), 253-261. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.04.072>
- Anguita, J. C., Labrador, J. R., Campos, J. D., Casas Anguita, J., Repullo Labrador, J., & Donado Campos, J. (2003). La encuesta como técnica de investigación. Elaboración de cuestionarios y tratamiento estadístico de los datos (I). *Atención primaria*, 31(8), 527-538.
- Antoninka, A., Bowker, M. A., Barger, N. N., Belnap, J., Giraldo-Silva, A., Reed, S. C., Garcia-Pichel, F., & Duniway, M. C. (2019). Addressing barriers to improve biocrust colonization and establishment in dryland restoration. *Restoration Ecology*, 28, S150-S159. <https://doi.org/10.1111/rec.13052>
- Antoninka, A., Faist, A., Rodríguez-Caballero, E., Young, K. E., Chaudhary, V. B., Condon, L. A., & Pyke, D. A. (2020). Biological soil crusts in ecological restoration: Emerging research and perspectives. *Restoration Ecology*, 28, S3-S8. <https://doi.org/10.1111/rec.13201>
- Aranibar, J. N., Repetur, M. J., García, V. R., Dazat, R. E., Videla, M. E. C., & Villagra, P. E. (2022). Functional responses of biological soil crusts to simulated small precipitation pulses in the Monte desert, Argentina. *Geoderma*, 410, 115660. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115660>
- Bastida, F., Hernandez, T., & Garcia, C. (2010). Soil Degradation and Rehabilitation: Microorganisms and Functionality. En H. Insam, I. Franke-Whittle, & M. Goberna (Eds.), *Microbes at Work: From Wastes to Resources* (pp. 253-270). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04043-6_13
- 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\[0181:TWAYFD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0181:TWAYFD]2.0.CO;2)

- Belnap, J., Büdel, B., & Lange, O. L. (2003). Biological Soil Crusts: Characteristics and Distribution. En J. Belnap & O. L. Lange (Eds.), *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management* (pp. 3-30). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8_1
- Belnap, J., Walker, B. J., Munson, S. M., & Gill, R. A. (2014). Controls on sediment production in two U.S. deserts. *Aeolian Research*, 14, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.03.007>
- 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 International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_1
- Berdugo, M., Delgado-Baquerizo, M., Soliveres, S., Hernández-Clemente, R., Zhao, Y., Gaitán, J. J., Gross, N., Saiz, H., Maire, V., Lehmann, A., Rillig, M. C., Solé, R. V., & Maestre, F. T. (2020). Global ecosystem thresholds driven by aridity. *Science*, 367(6479), 787-790. <https://doi.org/10.1126/science.aay5958>
- Berkes, F., Folke, C., & Colding, J. (2000). *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. Cambridge University Press.
- Blake, W. H., Kelly, C., Wynants, M., Patrick, A., Lewin, S., Lawson, J., Nasolwa, E., Page, A., Nasser, M., Marks, C., Gilvear, D., Mtei, K., Munishi, L., & Ndakidemi, P. (2021). Integrating land-water-people connectivity concepts across disciplines for co-design of soil erosion solutions. *Land Degradation & Development*, 32(12), 3415-3430. <https://doi.org/10.1002/ldr.3791>
- Borda, O. F. (1999). Orígenes universales y retos actuales de la IAP. *Análisis Político*, 38, Article 38.
- Bowker, M. A. (2007). Biological Soil Crust Rehabilitation in Theory and Practice: An Underexploited Opportunity. *Restoration Ecology*, 15(1), 13-23. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00185.x>
- Bowker, M. A., Antoninka, A. J., & Chuckran, P. F. (2019). Improving field success of biocrust rehabilitation materials: Hardening the organisms or softening the environment? *Restoration Ecology*, 28, S177-S186. <https://doi.org/10.1111/rec.12965>
- Bowker, M. A., Antoninka, A. J., & Durham, R. A. (2017). Applying community ecological theory to maximize productivity of cultivated biocrusts. *Ecological Applications*, 27(6), 1958-1969. <https://doi.org/10.1002/eap.1582>
- Bowker, M. A., Belnap, J., Bala Chaudhary, V., & Johnson, N. C. (2008). Revisiting classic water erosion models in drylands: The strong impact of biological soil crusts. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(9), 2309-2316. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.05.008>

- Bowker, M. A., Belnap, J., Büdel, B., Sannier, C., Pietrasiak, N., Eldridge, D. J., & Rivera-Aguilar, V. (2016). Controls on Distribution Patterns of Biological Soil Crusts at Micro- to Global Scales. En B. Weber, B. Büdel, & J. Belnap (Eds.), *Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands* (pp. 173-197). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_10
- Bowker, M. A., Belnap, J., Davidson, D. W., & Phillips, S. L. (2005). EVIDENCE FOR MICRONUTRIENT LIMITATION OF BIOLOGICAL SOIL CRUSTS: IMPORTANCE TO ARID-LANDS RESTORATION. *Ecological Applications*, 15(6), 1941-1951. <https://doi.org/10.1890/04-1959>
- Bowker, M. A., Maestre, F. T., & Escolar, C. (2010). Biological crusts as a model system for examining the biodiversity–ecosystem function relationship in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(3), 405-417. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.025>
- Bowling, D. R., Grote, E. E., & Belnap, J. (2011). Rain pulse response of soil CO₂ exchange by biological soil crusts and grasslands of the semiarid Colorado Plateau, United States. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G3). <https://doi.org/10.1029/2011JG001643>
- Briggs, A. L., & Morgan, J. W. (2012). Post-cultivation recovery of biological soil crusts in semi-arid native grasslands, southern Australia. *Journal of Arid Environments*, 77, 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.10.002>
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N., & Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y Bosques*, 24. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Brodo, I. M. (2016). *Keys to Lichens of North America: Revised and Expanded*. Yale University Press.
- Bruno, L., Billi, D., Bellezza, S., & Albertano, P. (2009). Cytomorphological and Genetic Characterization of Troglotic Leptolyngbya Strains Isolated from Roman Hypogea. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(3), 608-617. <https://doi.org/10.1128/AEM.01183-08>
- Caster, J., Sankey, T. Ts., Sankey, J. B., Bowker, M. A., Buscombe, D., Duniway, M. C., Barger, N., Faist, A., & Joyal, T. (2021). Biocrust and the soil surface: Influence of climate, disturbance, and biocrust recovery on soil surface roughness. *Geoderma*, 403, 115369. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115369>
- Cedillo, Y., Meza Cano, J. M., & Lima, N. (2017). DISEÑO Y CONFIABILIDAD DE UNA RÚBRICA PARA EVALUAR INFOGRAFÍAS DIDÁCTICAS Design and reliability of a didactic infographic rubric assessment. *Enseñanza & Teaching*, 17-36.
- Challenger, R., & Clegg, C. W. (2011). Crowd disasters: A socio-technical systems perspective. *Contemporary Social Science*, 6(3), 343-360. <https://doi.org/10.1080/21582041.2011.619862>

- Chamizo, S., Adessi, A., Certini, G., & De Philippis, R. (2020). Cyanobacteria inoculation as a potential tool for stabilization of burned soils. *Restoration Ecology*, 28(S2), S106-S114. <https://doi.org/10.1111/rec.13092>
- Chamizo, S., Adessi, A., Mugnai, G., Simiani, A., & De Philippis, R. (2019). Soil Type and Cyanobacteria Species Influence the Macromolecular and Chemical Characteristics of the Polysaccharidic Matrix in Induced Biocrusts. *Microbial Ecology*, 78(2), 482-493. <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1305-y>
- Chamizo, S., Cantón, Y., Miralles, I., & Domingo, F. (2012). Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 49, 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.017>
- Chamizo, S., Mugnai, G., Rossi, F., Certini, G., & De Philippis, R. (2018). Cyanobacteria Inoculation Improves Soil Stability and Fertility on Different Textured Soils: Gaining Insights for Applicability in Soil Restoration. *Frontiers in Environmental Science*, 6. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2018.00049>
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., & Sommer, S. (2018). *World Atlas of Desertification*. Office of the European Union,. <https://wad.jrc.ec.europa.eu/download>
- Chock, T., Antoninka, A. J., Faist, A. M., Bowker, M. A., Belnap, J., & Barger, N. N. (2019a). Responses of biological soil crusts to rehabilitation strategies. *Journal of Arid Environments*, 163, 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.10.007>
- Chock, T., Antoninka, A. J., Faist, A. M., Bowker, M. A., Belnap, J., & Barger, N. N. (2019b). Responses of biological soil crusts to rehabilitation strategies. *Journal of Arid Environments*, 163, 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.10.007>
- Choi, S., Song, H., Tripathi, B. M., Kerfahi, D., Kim, H., & Adams, J. M. (2017). Effect of experimental soil disturbance and recovery on structure and function of soil community: A metagenomic and metagenetic approach. *Scientific Reports*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02262-6>
- Cockell, C. S., & Knowland, J. (1999). Ultraviolet radiation screening compounds. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 74(3), 311-345. <https://doi.org/10.1017/S0006323199005356>
- Collins, S. L., Sinsabaugh, R. L., Crenshaw, C., Green, L., Porras-Alfaro, A., Stursova, M., & Zeglin, L. H. (2008). Pulse dynamics and microbial processes in aridland ecosystems. *Journal of Ecology*, 96(3), 413-420. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01362.x>
- CONANP. (2006). *Programa de Conservación y Manejo de la Reserva de la Biosfera de Maimí, México*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- Concostrina-Zubiri, L., Huber-Sannwald, E., Martínez, I., Flores, J. L. F., 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(7), 1863-1877. <https://doi.org/10.1890/13-1416.1>

- Concostrina-Zubiri, L., Molla, I., Velizarova, E., & Branquinho, C. (2017). Grazing or Not Grazing: Implications for Ecosystem Services Provided by Biocrusts in Mediterranean Cork Oak Woodlands. *Land Degradation & Development*, 28(4), 1345-1353. <https://doi.org/10.1002/ldr.2573>
- Condon, L. A., Pietrasiak, N., Rosentreter, R., & Pyke, D. A. (2020). Passive restoration of vegetation and biological soil crusts following 80 years of exclusion from grazing across the Great Basin. *Restoration Ecology*, 28(S2), S75-S85. <https://doi.org/10.1111/rec.13021>
- 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>
- Corbin, J. D., & Thiet, R. K. (2020). Temperate biocrusts: Mesic counterparts to their better-known dryland cousins. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(8), 456-464. <https://doi.org/10.1002/fee.2234>
- Cornet, A. (1988). Principales características climáticas. En *Estudio integrado de los recursos de vegetación, suelo y agua en la reserva de la biosfera de Mapimí*. (pp. 45-76). INECOL.
- Cornwall, A., & Jewkes, R. (1995). What is participatory research? *Social Science & Medicine*, 41(12), 1667-1676. [https://doi.org/10.1016/0277-9536\(95\)00127-S](https://doi.org/10.1016/0277-9536(95)00127-S)
- de Vries, F. T., & Griffiths, R. I. (2018). Chapter Five—Impacts of Climate Change on Soil Microbial Communities and Their Functioning. En W. R. Horwath & Y. Kuzyakov (Eds.), *Developments in Soil Science* (Vol. 35, pp. 111-129). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63865-6.00005-3>
- Dickensheets, D. L., Wynn-Williams, D. D., Edwards, H. G. M., Schoen, C., Crowder, C., & Newton, E. M. (2000). A novel miniature confocal microscope/Raman spectrometer system for biomolecular analysis on future Mars missions after Antarctic trials. *Journal of Raman Spectroscopy*, 31(7), 633-635. [https://doi.org/10.1002/1097-4555\(200007\)31:7<633::AID-JRS620>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/1097-4555(200007)31:7<633::AID-JRS620>3.0.CO;2-R)
- DOF. (2000). *PROGRAMA DE MANEJO DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA MAPIMI*. http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=4935226
- Dojani, S., Büdel, B., Deutschewitz, K., & Weber, B. (2011). Rapid succession of Biological Soil Crusts after experimental disturbance in the Succulent Karoo, South Africa. *Applied Soil Ecology*, 48(3), 263-269. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.04.013>
- Edwards, H. G. M. (2007). A novel extremophile strategy studied by Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 68(4), 1126-1132. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2006.11.029>
- Eldridge, D. J., Freudenberger, D., & Koen, T. B. (2006). Diversity and Abundance of Biological Soil Crust Taxa in Relation to Fine and Coarse-Scale Disturbances in a Grassy Eucalypt Woodland in Eastern Australia. *Plant and Soil*, 281(1), 255-268. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-4436-0>

- Eldridge, D. J., Mallen-Cooper, M., & Ding, J. (2021). Biocrust functional traits reinforce runoff patchiness in drylands. *Geoderma*, 400, 115152. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115152>
- Eldridge, D. J., & Rosentreter, R. (1999). Morphological groups: A framework for monitoring microphytic crusts in arid landscapes. *Journal of Arid Environments*, 41(1), 11-25. <https://doi.org/10.1006/jare.1998.0468>
- Ellison, A. M. (2016). It's time to get real about conservation. *Nature*, 538(7624), Article 7624. <https://doi.org/10.1038/538141a>
- Faist, A. M., Antoninka, A. J., Belnap, J., Bowker, M. A., Duniway, M. C., Garcia-Pichel, F., Nelson, C., Reed, S. C., Giraldo-Silva, A., Velasco-Ayuso, S., & Barger, N. N. (2020). Inoculation and habitat amelioration efforts in biological soil crust recovery vary by desert and soil texture. *Restoration Ecology*, 28(S2), S96-S105. <https://doi.org/10.1111/rec.13087>
- Faist, A. M., Herrick, J. E., Belnap, J., Van Zee, J. W., & Barger, N. N. (2017). Biological soil crust and disturbance controls on surface hydrology in a semi-arid ecosystem. *Ecosphere*, 8(3), e01691. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1691>
- FAO. (2003). *Module II: Introducing Participatory Approaches, Methods and Tools*. <https://www.fao.org/4/ad424e/ad424e03.htm#bm3>
- FAO. (2008). *Dryland—Global Assessment*. <https://www.fao.org/dryland-assessment/es/>
- FAO. (2015). *Suelos y biodiversidad: Los suelos albergan una cuarta parte de la biodiversidad de nuestro planeta*. 4.
- Fick, S. E., Barger, N. N., & Duniway, M. C. (2019). Hydrological function of rapidly induced biocrusts. *Ecohydrology*, 12(4), e2089. <https://doi.org/10.1002/eco.2089>
- Fick, S. E., Day, N., Duniway, M. C., Hoy-Skubik, S., & Barger, N. N. (2019). Microsite enhancements for soil stabilization and rapid biocrust colonization in degraded drylands. *Restoration Ecology*, 28, S139-S149. <https://doi.org/10.1111/rec.13071>
- Fischer, T., Gypser, S., Subbotina, M., & Veste, M. (2014). Synergic hydraulic and nutritional feedback mechanisms control surface patchiness of biological soil crusts on tertiary sands at a post-mining site. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(4), 293-302.
- Fischer, T., Veste, M., Schaaf, W., Dümig, A., Kögel-Knabner, I., Wiehe, W., Bens, O., & Hüttl, R. F. (2010). Initial pedogenesis in a topsoil crust 3 years after construction of an artificial catchment in Brandenburg, NE Germany. *Biogeochemistry*, 101(1), 165-176. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9464-z>
- Fischer, T., Veste, M., Wiehe, W., & Lange, P. (2010). Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbiotic crusts on inland dunes, Brandenburg, NE Germany. *CATENA*, 80(1), 47-52. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.08.009>
- Fraenkel, J., Wallen, N., & Hyun, H. (2011). How to Design and Evaluate Research in Education. En *Journal of American Optometric Association* (Vol. 60).

- Galvin, K. A., Reid, R. S., Fernández-Giménez, M. E., Kaelo, D. ole, Baival, B., & Krebs, M. (2016). Co-design of transformative research for rangeland sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 20, 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.03.003>
- Giraldo-Silva, A., Nelson, C., Barger, N. N., & Garcia-Pichel, F. (2019). Nursing biocrusts: Isolation, cultivation, and fitness test of indigenous cyanobacteria. *Restoration Ecology*, 27(4), 793-803. <https://doi.org/10.1111/rec.12920>
- Giraldo-Silva, A., Nelson, C., Penfold, C., Barger, N. N., & Garcia-Pichel, F. (2020). Effect of preconditioning to the soil environment on the performance of 20 cyanobacterial strains used as inoculum for biocrust restoration. *Restoration Ecology*, 28(S2). <https://doi.org/10.1111/rec.13048>
- Goldfarb, K., Karaoz, U., Hanson, C., Santee, C., Bradford, M., Treseder, K., Wallenstein, M., & Brodie, E. (2011). Differential Growth Responses of Soil Bacterial Taxa to Carbon Substrates of Varying Chemical Recalcitrance. *Frontiers in Microbiology*, 2. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2011.00094>
- Gómez, A., & Dirzo, R. (1995). *Reserva de la Biosfera y otras Áreas Naturales Protegidas de México*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Griffiths, R. I., Thomson, B. C., James, P., Bell, T., Bailey, M., & Whiteley, A. S. (2011). The bacterial biogeography of British soils. *Environmental Microbiology*, 13(6), 1642-1654. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2011.02480.x>
- Grote, E. E., Belnap, J., Housman, D. C., & Sparks, J. P. (2010). Carbon exchange in biological soil crust communities under differential temperatures and soil water contents: Implications for global change. *Global Change Biology*, 16(10), 2763-2774. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02201.x>
- Gypser, S., Veste, M., Fischer, T., & Lange, P. (2015). *Formation of soil lichen crusts at reclaimed post-mining sites, Lower Lusatia, North-east Germany*. <https://opus4.kobv.de/opus4-UBICO/frontdoor/index/index/docId/14865>
- He, M., Hu, R., & Jia, R. (2019). Biological soil crusts enhance the recovery of nutrient levels of surface dune soil in arid desert regions. *Ecological Indicators*, 106, 105497. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105497>
- Herrick, J. E., Whitford, W. G., de Soyza, A. G., Van Zee, J. W., Havstad, K. M., Seybold, C. A., & Walton, M. (2001). Field soil aggregate stability kit for soil quality and rangeland health evaluations. *CATENA*, 44(1), 27-35. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00173-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00173-9)
- Herrick, J., Whitford, W., Soyza, A., Van Zee, J., Havstad, K., Seybold, C., & Walton, M. (2001). Field soil aggregate stability kit for soil quality and rangeland health evaluations. *Catena*, 44, 27-35. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00173-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00173-9)
- Housman, D. C., Powers, H. H., Collins, A. D., & Belnap, J. (2006). Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado

- Plateau and Chihuahuan Desert. *Journal of Arid Environments*, 66(4), 620-634. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.11.014>
- Huxman, T. E., Snyder, K. A., Tissue, D., Leffler, A. J., Ogle, K., Pockman, W. T., Sandquist, D. R., Potts, D. L., & Schwinning, S. (2004). Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, 141(2), 254-268. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1682-4>
- INEGI. (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*.
- Kadykalo, A. N., López-Rodriguez, M. D., Ainscough, J., Droste, N., Ryu, H., Ávila-Flores, G., Le Clec'h, S., Muñoz, M. C., Nilsson, L., Rana, S., Sarkar, P., Sevecke, K. J., & Harmáčková, Z. V. (2019). Disentangling 'ecosystem services' and 'nature's contributions to people'. *Ecosystems and People*, 15(1), 269-287. <https://doi.org/10.1080/26395916.2019.1669713>
- Takeh, J., Gorji, M., Mohammadi, M. H., Asadi, H., Khormali, F., Sohrabi, M., & Eldridge, D. J. (2021). Biocrust islands enhance infiltration, and reduce runoff and sediment yield on a heavily salinized dryland soil. *Geoderma*, 404, 115329. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115329>
- Karaoz, U., Couradeau, E., da Rocha, U. N., Lim, H.-C., Northen, T., Garcia-Pichel, F., & Brodie, E. L. (2018). Large Blooms of Bacillales (Firmicutes) Underlie the Response to Wetting of Cyanobacterial Biocrusts at Various Stages of Maturity. *mBio*, 9(2), 10.1128/mbio.01366-16. <https://doi.org/10.1128/mbio.01366-16>
- Karimi, A., Tahmourespour, A., & Hoodaji, M. (2022). The formation of biocrust and improvement of soil properties by the exopolysaccharide-producing cyanobacterium: A biogeotechnological study. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02336-0>
- Kheirfam, H., & Roohi, M. (2020). Accelerating the formation of biological soil crusts in the newly dried-up lakebeds using the inoculation-based technique. *Science of The Total Environment*, 706, 136036. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136036>
- Kidron, G. J. (2019). Biocrust research: A critical view on eight common hydrological-related paradigms and dubious theses. *Ecohydrology*, 12(2), e2061. <https://doi.org/10.1002/eco.2061>
- Kidron, G. J. (2021). The role of biocrust-induced exopolymeric matrix in runoff generation in arid and semiarid zones – a mini review. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 69(4), 360-368. <https://doi.org/10.2478/johh-2021-0028>
- Kidron, G. J., Wang, Y., & Herzberg, M. (2020). Exopolysaccharides may increase biocrust rigidity and induce runoff generation. *Journal of Hydrology*, 588, 125081. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125081>
- Kwiecinski, J. V., Stricker, E., Sinsabaugh, R. L., & Collins, S. L. (2020). Rainfall pulses increased short-term biocrust chlorophyll but not fungal abundance or N availability in a long-term dryland rainfall manipulation experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 142, 107693. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107693>

- Lan, S., Zhang, Q., Wu, L., Liu, Y., Zhang, D., & Hu, C. (2014). Artificially accelerating the reversal of desertification: Cyanobacterial inoculation facilitates the succession of vegetation communities. *Environmental Science & Technology*, 48(1), 307-315. <https://doi.org/10.1021/es403785j>
- Lange, O. L. (2003). Photosynthesis of Soil-Crust Biota as Dependent on Environmental Factors. En J. Belnap & O. L. Lange (Eds.), *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management* (pp. 217-240). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8_18
- Lange, W. (1974). Chelating agents and blue-green algae. *Canadian Journal of Microbiology*, 20(10), 1311-1321. <https://doi.org/10.1139/m74-204>
- Langhans, T. M., Storm, C., & Schwabe, A. (2010a). Regeneration processes of biological soil crusts, macro-cryptogams and vascular plant species after fine-scale disturbance in a temperate region: Recolonization or successional replacement? *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 205(1), 46-60. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2008.12.001>
- Langhans, T. M., Storm, C., & Schwabe, A. (2010b). Regeneration processes of biological soil crusts, macro-cryptogams and vascular plant species after fine-scale disturbance in a temperate region: Recolonization or successional replacement? *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 205(1), 46-60. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2008.12.001>
- Lauber, C. L., Hamady, M., Knight, R., & Fierer, N. (2009). Pyrosequencing-Based Assessment of Soil pH as a Predictor of Soil Bacterial Community Structure at the Continental Scale. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(15), 5111-5120. <https://doi.org/10.1128/AEM.00335-09>
- Lazard, A., & Atkinson, L. (2015). Putting Environmental Infographics Center Stage: The Role of Visuals at the Elaboration Likelihood Model's Critical Point of Persuasion. *Science Communication*, 37(1), 6-33. <https://doi.org/10.1177/1075547014555997>
- Lázaro, R., Cantón, Y., Solé-Benet, A., Bevan, J., Alexander, R., Sancho, L. G., & Puigdefábregas, J. (2008). The influence of competition between lichen colonization and erosion on the evolution of soil surfaces in the Tabernas badlands (SE Spain) and its landscape effects. *Geomorphology*, 102(2), 252-266. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.005>
- Li, X. R., Zhang, P., Su, Y. G., & Jia, R. L. (2012). Carbon fixation by biological soil crusts following revegetation of sand dunes in arid desert regions of China: A four-year field study. *CATENA*, 97, 119-126. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.05.009>
- Li, Z., Chen, C., Gao, Y., Wang, B., Wang, D., Du, Y., Liu, L., Wu, Z., & Cai, D. (2021). Synergistic effect of cyanobacteria and nano-sand-stabilizer on biocrust formation and sand fixation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104887. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104887>
- Liu, L., Liu, Y., Hui, R., & Xie, M. (2017). Recovery of microbial community structure of biological soil crusts in successional stages of Shapotou desert revegetation,

- northwest China. *Soil Biology and Biochemistry*, 107, 125-128. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.030>
- López Reyes, M. (2001). Degradación de suelos en Sonora: El problema de la erosión en los suelos de uso ganadero. *Región y sociedad*, 13(22), 73-97.
- López-Legarda, X., Taramuel-Gallardo, A., Arboleda-Echavarría, C., Segura-Sánchez, F., & Restrepo-Betancur, L. F. (2017). Comparación de métodos que utilizan ácido sulfúrico para la determinación de azúcares totales. *Revista Cubana de Química*, 29(2), 180-198.
- López-Rodríguez, M. D., Chamizo, S., Cantón, Y., & Rodríguez-Caballero, E. (2020). Identifying social–ecological gaps to promote biocrust conservation actions. *Web Ecology*, 20(2), 117-132. <https://doi.org/10.5194/we-20-117-2020>
- Maestre, F. T., Martín, N., Díez, B., López-Poma, R., Santos, F., Luque, I., & Cortina, J. (2006). Watering, Fertilization, and Slurry Inoculation Promote Recovery of Biological Crust Function in Degraded Soils. *Microbial Ecology*, 52(3), 365-377. <https://doi.org/10.1007/s00248-006-9017-0>
- Maggioli, L., Lopez Rodriguez, M., Chamizo, S., Cantón, Y., & Rodríguez-Caballero, E. (2021). *Applying the socio-ecological approach to biocrust research: A call for scientific action*. EGU21-16195. EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Maier, S., Schmidt, T. S. B., Zheng, L., Peer, T., Wagner, V., & Grube, M. (2014). Analyses of dryland biological soil crusts highlight lichens as an important regulator of microbial communities. *Biodiversity and Conservation*, 23(7), 1735-1755. <https://doi.org/10.1007/s10531-014-0719-1>
- Mallen-Cooper, M., Bowker, M. A., Antoninka, A. J., & Eldridge, D. J. (2020). A practical guide to measuring functional indicators and traits in biocrusts. *Restoration Ecology*, 28(S2), S56-S66. <https://doi.org/10.1111/rec.12974>
- Marschner, H. (2011). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press.
- Mauser, W., Klepper, G., Rice, M., Schmalzbauer, B. S., Hackmann, H., Leemans, R., & Moore, H. (2013). Transdisciplinary global change research: The co-creation of knowledge for sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(3), 420-431. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.07.001>
- McGarvey, D. J., & Mason, C. A. (2015). Re-Envisioning the Communication of our Science. *Limnology and Oceanography Bulletin*, 24(1), 1-4. <https://doi.org/10.1002/lob.10007>
- Miralles, I., Jorge-Villar, S. e., Cantón, Y., & Domingo, F. (2012). Using a Mini-Raman Spectrometer to Monitor the Adaptive Strategies of Extremophile Colonizers in Arid Deserts: Relationships Between Signal Strength, Adaptive Strategies, Solar Radiation, and Humidity. *Astrobiology*, 12(8), 743-753. <https://doi.org/10.1089/ast.2011.0763>
- Miralles, I., Lázaro, R., Sánchez-Marañón, M., Soriano, M., & Ortega, R. (2020). Biocrust cover and successional stages influence soil bacterial composition and diversity in

- semiarid ecosystems. *Science of The Total Environment*, 709, 134654. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134654>
- Miralles, I., Trasar-Cepeda, C., Soria, R., Ortega, R., & Lucas-Borja, M. E. (2021). Environmental and ecological factors influencing soil functionality of biologically crusted soils by different lichen species in drylands. *Science of The Total Environment*, 794, 148491. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148491>
- Moll, S., Wyndham-West, M., Mulvale, G., Park, S., Buettgen, A., Phoenix, M., Fleisig, R., & Bruce, E. (2020). Are you really doing «codesign»? Critical reflections when working with vulnerable populations. *BMJ Open*, 10(11), e038339. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-038339>
- Monterrubio, E. (2020). *Función socioecohidrológica de la biocostra en la Reserva de la Biosfera de Mapimí, Durango*. División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Moyano, F. E., Manzoni, S., & Chenu, C. (2013). Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. *Soil Biology and Biochemistry*, 59, 72-85. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.01.002>
- Mugnai, G., Rossi, F., Felde, V. J. M. N. L., Colesie, C., Büdel, B., Peth, S., Kaplan, A., & De Philippis, R. (2018). Development of the polysaccharidic matrix in biocrusts induced by a cyanobacterium inoculated in sand microcosms. *Biology and Fertility of Soils*, 54(1), 27-40. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1234-9>
- Mugnai, G., Rossi, F., Felde, V. J. M. N. L., Colesie, C., Büdel, B., Peth, S., Kaplan, A., & Philippis, R. D. (2018). Development of the polysaccharidic matrix in biocrusts induced by a cyanobacterium inoculated in sand microcosms. *Biology and Fertility of Soils*, 54(1), 27-40. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1234-9>
- Muñoz Fernández, N., & Lucas Barcia, E. (2022). Evaluación de infográficos durante el primer año de pandemia en «El País Digital» (2020-2021). *Index.comunicación: Revista científica en el ámbito de la Comunicación Aplicada*, 12(1), 177-204.
- Nakamori, H., Yatabe, T., Yoon, K.-S., & Ogo, S. (2014). Purification and characterization of an oxygen-evolving photosystem II from *Leptolyngbya* sp. Strain O-77. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 118(2), 119-124. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.01.009>
- Nash, T. H. (2002). *Lichen flora of the greater Sonoran desert region*.
- Nelson, C., Giraldo-Silva, A., & Garcia-Pichel, F. (2020). A Fog-Irrigated Soil Substrate System Unifies and Optimizes Cyanobacterial Biocrust Inoculum Production. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(13), e00624-20. <https://doi.org/10.1128/AEM.00624-20>
- Nielsen, U. N., & Ball, B. A. (2015). Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems. *Global Change Biology*, 21(4), 1407-1421. <https://doi.org/10.1111/gcb.12789>

- Ochoa-Hueso, R., Hernandez, R. R., Pueyo, J. J., & Manrique, E. (2011). Spatial distribution and physiology of biological soil crusts from semi-arid central Spain are related to soil chemistry and shrub cover. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1894-1901. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.05.010>
- Peng, C., Zheng, J., Huang, S., Li, S., Li, D., Cheng, M., & Liu, Y. (2017). Application of sodium alginate in induced biological soil crusts: Enhancing the sand stabilization in the early stage. *Journal of Applied Phycology*, 29(3), 1421-1428. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1061-2>
- Phillips, M. L., McNellis, B. E., Howell, A., Lauria, C. M., Belnap, J., & Reed, S. C. (2022). Biocrusts mediate a new mechanism for land degradation under a changing climate. *Nature Climate Change*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01249-6>
- Pushkareva, E., Pessi, I. S., Wilmotte, A., & Elster, J. (2015). Cyanobacterial community composition in Arctic soil crusts at different stages of development. *FEMS Microbiology Ecology*, 91(12), fiv143. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiv143>
- Ramírez-Carballo, H., Pedroza-Sandoval, A., Martínez-Rodríguez, J. G., & Valdez-Cepeda, R. D. (2011). Evaluación participativa de la degradación del suelo en la Reserva de la Biosfera Mapimí. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(SPE), 01-09. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.058>
- Rice, L. (2018). Nonhumans in participatory design. *CoDesign*, 14(3), 238-257. <https://doi.org/10.1080/15710882.2017.1316409>
- Ritchie, R. J. (2006). Consistent Sets of Spectrophotometric Chlorophyll Equations for Acetone, Methanol and Ethanol Solvents. *Photosynthesis Research*, 89(1), 27-41. <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9065-9>
- Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y., Chamizo, S., Afana, A., & Solé-Benet, A. (2012). Effects of biological soil crusts on surface roughness and implications for runoff and erosion. *Geomorphology*, 145-146, 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.042>
- Rodríguez-Caballero, E., Castro, A. J., Chamizo, S., Quintas-Soriano, C., Garcia-Llorente, M., Cantón, Y., & Weber, B. (2018). Ecosystem services provided by biocrusts: From ecosystem functions to social values. *Journal of Arid Environments*, 159, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.005>
- Román, J. R., Rodríguez-Caballero, E., Rodríguez-Lozano, B., Roncero-Ramos, B., Chamizo, S., Águila-Carricondo, P., & Cantón, Y. (2019). Spectral Response Analysis: An Indirect and Non-Destructive Methodology for the Chlorophyll Quantification of Biocrusts. *Remote Sensing*, 11(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/rs11111350>
- Román, J. R., Roncero-Ramos, B., Rodríguez-Caballero, E., Chamizo, S., & Cantón, Y. (2021). Effect of water availability on induced cyanobacterial biocrust development. *CATENA*, 197, 104988. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104988>

- Romani, A., Casnati, F., & Ianniello, A. (2022). Codesign with more-than-humans: Toward a meta co-design tool for human-non-human collaborations. *European Journal of Futures Research*, 10(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s40309-022-00205-7>
- Roncero-Ramos, B., Román, J. R., Rodríguez-Caballero, E., Chamizo, S., Águila-Carricondo, P., Mateo, P., & Cantón, Y. (2019). Assessing the influence of soil abiotic and biotic factors on Nostoc commune inoculation success. *Plant and Soil*, 444(1), 57-70. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04239-y>
- Rosentreter, R., Bowker, M. A., & Belnap, J. (2007). *A Field Guide to Biological Soil Crusts of Western U.S. Drylands. Common Lichens and Bryophytes*.
- Rossi, F., Li, H., Liu, Y., & De Philippis, R. (2017). Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): Perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal. *Earth-Science Reviews*, 171, 28-43. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.05.006>
- Saleh, A. (1993). Soil roughness measurement: Chain method. *Journal of Soil and Water Conservation*, 48(6), 527-529.
- Sánchez-Marañón, M., Miralles, I., Aguirre-Garrido, J. F., Anguita-Maeso, M., Millán, V., Ortega, R., García-Salcedo, J. A., Martínez-Abarca, F., & Soriano, M. (2017). Changes in the soil bacterial community along a pedogenic gradient. *Scientific Reports*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15133-x>
- Sanders, E. (2005). *Information, Inspiration and Cocreation*.
- Sanders, E. B.-N., & Stappers, P. J. (2008). Co-creation and the new landscapes of design. *CoDesign*, 4(1), 5-18. <https://doi.org/10.1080/15710880701875068>
- Schouten, S. E., Kip, H., Dekkers, T., Deenik, J., Beerlage-de Jong, N., Ludden, G. D. S., & Kelders, S. M. (2022). Best-practices for co-design processes involving people with severe mental illness for eMental health interventions: A qualitative multi-method approach. *Design for Health*, 6(3), 316-344. <https://doi.org/10.1080/24735132.2022.2145814>
- Silva-Gómez, S., Pérez Avilés, R., & sanchez-porras, A. (2015). *Los servicios ambientales ante un cambio de paradigma*. 6, 35-45.
- SMN. (2021). *Información Climatológica por estado*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=dgo>
- Steven, B., Gallegos-Graves, L. V., Yeager, C., Belnap, J., & Kuske, C. R. (2014). Common and distinguishing features of the bacterial and fungal communities in biological soil crusts and shrub root zone soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 69, 302-312. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.11.008>
- Su, Y., Liu, J., Zhang, B., Zhao, H., & Huang, G. (2020). Habitat-specific environmental factors regulate spatial variability of soil bacterial communities in biocrusts across northern China's drylands. *Science of The Total Environment*, 719, 137479. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137479>

- Su, Y., Zhao, X., Li, A., Li, X., & Huang, G. (2011). Nitrogen fixation in biological soil crusts from the Tengger desert, northern China. *European Journal of Soil Biology*, 47(3), 182-187. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.04.001>
- Swenson, T. L., Karaoz, U., Swenson, J. M., Bowen, B. P., & Northen, T. R. (2018). Linking soil biology and chemistry in biological soil crust using isolate exometabolomics. *Nature Communications*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02356-9>
- Teixeira, A. S. G. (2018). *Marine litter: Social representations and persuasion in science communication through infographics*. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/114329>
- Thomey, M. L., Collins, S. L., Vargas, R., Johnson, J. E., Brown, R. F., Natvig, D. O., & Friggens, M. T. (2011). Effect of precipitation variability on net primary production and soil respiration in a Chihuahuan Desert grassland. *Global Change Biology*, 17(4), 1505-1515. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02363.x>
- Tian, C., Pang, J., Bu, C., Wu, S., Bai, H., Li, Y., Guo, Q., & Siddique, K. H. M. (2023). The Microbiomes in Lichen and Moss Biocrust Contribute Differently to Carbon and Nitrogen Cycles in Arid Ecosystems. *Microbial Ecology*, 86(1), 497-508. <https://doi.org/10.1007/s00248-022-02077-7>
- Tongway, D. J., & Hindley, N. L. (2004). *Landscape function analysis manual: Procedures for monitoring and assessing landscapes with special reference to minesites and rangelands*. CSIRO Sustainable Ecosystems Canberra, Australia.
- Trexler, R. V., Van Goethem, M. W., Goudeau, D., Nath, N., Malmstrom, R. R., Northen, T. R., & Couradeau, E. (2023). BONCAT-FACS-Seq reveals the active fraction of a biocrust community undergoing a wet-up event. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1176751. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1176751>
- UNCCD. (2017). *The Global Land Outlook, First Edition*. Bonn, Germany. Retrieved from *UNCCD Global Land Outlook*.
- UNEP. (2017). *Global Environment Outlook: Environment for Development (GEO-4)*.
- Van Goethem, M. W., Swenson, T. L., Trubl, G., Roux, S., & Northen, T. R. (2019). Characteristics of Wetting-Induced Bacteriophage Blooms in Biological Soil Crust. *mBio*, 10(6), 10.1128/mbio.02287-19. <https://doi.org/10.1128/mbio.02287-19>
- Velasco Ayuso, S., Giraldo Silva, A., Nelson, C., Barger, N. N., & Garcia-Pichel, F. (2017). Microbial Nursery Production of High-Quality Biological Soil Crust Biomass for Restoration of Degraded Dryland Soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 83(3), e02179-16. <https://doi.org/10.1128/AEM.02179-16>
- Wang, J., Zhang, P., Bao, J.-T., Zhao, J.-C., Song, G., Yang, H.-T., Huang, L., He, M.-Z., & Li, X.-R. (2020). Comparison of cyanobacterial communities in temperate deserts: A cue for artificial inoculation of biological soil crusts. *Science of The Total Environment*, 745, 140970. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140970>

- Wang, L., D'Odorico, P., Evans, J. P., Eldridge, D. J., McCabe, M. F., Caylor, K. K., & King, E. G. (2012). Dryland ecohydrology and climate change: Critical issues and technical advances. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2585-2603. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2585-2012>
- Wang, Q., Han, Y., Lan, S., & Hu, C. (2021). Metagenomic Insight Into Patterns and Mechanism of Nitrogen Cycle During Biocrust Succession. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2021.633428>
- Weber, B., Belnap, J., Büdel, B., Antoninka, A. J., Barger, N. N., Chaudhary, V. B., Darrouzet-Nardi, A., Eldridge, D. J., Faist, A. M., Ferrenberg, S., Havrilla, C. A., Huber-Sannwald, E., Malam Issa, O., Maestre, F. T., Reed, S. C., Rodriguez-Caballero, E., Tucker, C., Young, K. E., Zhang, Y., ... Bowker, M. A. (2022). What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening research community. *Biological Reviews*, 97(5), 1768-1785. <https://doi.org/10.1111/brv.12862>
- Wei, W., Yu, Y., & Chen, L. (2015). Response of Surface Soil Hydrology to the Micro-Pattern of Bio-Crust in a Dry-Land Loess Environment, China. *PLOS ONE*, 10(7), e0133565. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133565>
- Wu, Y.-S., Li, X.-R., Hasi-Eerdun, Yin, R.-P., & Liu, T.-J. (2020). Surface roughness response of biocrust-covered soil to mimicked sheep trampling in the Mu Us sandy Land, northern China. *Geoderma*, 363, 114146. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114146>
- Wynn-Williams, D. (2000). Proximal Analysis of Regolith Habitats and Protective Biomolecules in Situ by Laser Raman Spectroscopy: Overview of Terrestrial Antarctic Habitats and Mars Analogs. *Icarus*, 144(2), 486-503. <https://doi.org/10.1006/icar.1999.6307>
- Xiao, B., Zhao, Y., Wang, Q., & Li, C. (2015). Development of artificial moss-dominated biological soil crusts and their effects on runoff and soil water content in a semi-arid environment. *Journal of Arid Environments*, 117, 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.02.017>
- Xu, L., Zhang, B., Wang, E., Zhu, B., Yao, M., Li, C., & Li, X. (2021). Soil total organic carbon/total nitrogen ratio as a key driver deterministically shapes diazotrophic community assemblages during the succession of biological soil crusts. *Soil Ecology Letters*, 3(4), 328-341. <https://doi.org/10.1007/s42832-020-0075-x>
- Young, K. E., Bowker, M. A., Reed, S. C., Duniway, M. C., & Belnap, J. (2019). Temporal and abiotic fluctuations may be preventing successful rehabilitation of soil-stabilizing biocrust communities. *Ecological Applications*, 29(5), e01908. <https://doi.org/10.1002/eap.1908>
- Zaady, E., Ben-David, E. A., Sher, Y., Tzirkin, R., & Nejdat, A. (2010). Inferring biological soil crust successional stage using combined PLFA, DGGE, physical and biophysiological analyses. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(5), 842-849. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.02.002>

- Zhao, Y., Bowker, M. A., Zhang, Y., & Zaady, E. (2016). Enhanced recovery of biological soil crusts after disturbance. En *Biological soil crusts: An organizing principle in drylands* (pp. 499-523). Springer.
- Zhao, Y., Xu, M., & Belnap, J. (2010). Potential nitrogen fixation activity of different aged biological soil crusts from rehabilitated grasslands of the hilly Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 74(10), 1186-1191. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.04.006>
- Zheng, Y., Xu, M., Zhao, J., Bei, S., & Hao, L. (2011). Effects of inoculated *Microcoleus vaginatus* on the structure and function of biological soil crusts of desert. *Biology and Fertility of Soils*, 47(4), 473-480. <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0521-5>
- Zhou, X., Zhao, Y., Belnap, J., Zhang, B., Bu, C., & Zhang, Y. (2020). Practices of biological soil crust rehabilitation in China: Experiences and challenges. *Restoration Ecology*, 28, S45-S55. <https://doi.org/10.1111/rec.13148>

4.0 Conclusión

En la última década, la restauración de los sistemas socio ecológicos degradados mediante la inoculación de biocostras ha cobrado relevancia. Sin embargo, el vínculo con las comunidades locales que habitan estas zonas, no se ha terminado de reconocer, por lo que es necesario considerarlo como un sistema socioecológico, en el que las comunidades humanas, confieren la estructura y funcionalidad. Examinar el proceso de recuperación de la biocostra en suelos perturbados por la ganadería, considerando la influencia del riego, el tiempo de recuperación y diferentes inóculos de biocostra, nos permitió comprender cómo la comunidad microbiana de la biocostra utiliza recursos para su recolonización y recuperación de funciones ecológicas. Los resultados del capítulo 1 indican que el proceso de recuperación de las biocostras inoculadas en suelo perturbado por la actividad ganadera se encuentran influenciadas por los metabolitos celulares de los microorganismos presentes, como la clorofila a y los exopolisacáridos (EPS). La cantidad de agua utilizada en los procesos de inoculación afecta significativamente la recuperación de las biocostras, ya que algunas especies microbianas requieren mayores cantidades de agua para su desarrollo, lo que implica un mayor uso de recursos para su funcionamiento en el ecosistema. Se analizaron tres tipos de biocostras, dos provenientes de un sitio conservado y una de un sitio perturbado por la alta intensidad ganadera. Los resultados sugieren que las biocostras del sitio perturbado adquieren rápidamente sus funciones celulares, aprovechando la menor cantidad de agua en los primeros meses de inoculación. Las cianobacterias, al ser los primeros microorganismos en colonizar las biocostras, utilizan el carbono para sintetizar exopolisacáridos (EPS), los cuáles agrupan las partículas del suelo y mejoran su estabilidad, así como también proteger el desarrollo de la cobertura de la biocostra. En comparación con otras investigaciones, se observó que a diferencia de lo que se pensaba, la rugosidad no es tan determinante en la retención de agua como los EPS, los cuáles pueden generar hidrofobicidad; un parámetro importante que se sugiere incorporar junto con la escurritía, en futuras investigaciones que evalúen la recuperación de la biocostra, para optimizar la disponibilidad de agua en un escenario de variabilidad climática, así como otros recursos de la restauración asociados a factores sociales, culturales, económicos y políticos.

Las biocostras oscuras dominadas por cianobacterias y líquenes provenientes del sitio conservado requieren más agua y tiempo para su desarrollo, lo que podría comprometer los esfuerzos de la restauración. Por el contrario, la biocostra clara dominada por

cianobacterias y algunos líquenes del sitio perturbado, uso una menor cantidad de riego para la producción de clorofila a. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los inóculos de biocostra, en lo correspondiente a la producción de EPS, la estabilidad de agregados y la rugosidad. El desarrollo de la cobertura temprana de biocostra (biocostra clara), incrementó significativamente bajo pulsos mínimos de riego, mientras que un estado sucesivo de biocostra oscura y liquen, incrementaron su desarrollo con un riego más alto. El porcentaje de suelo desnudo disminuyó significativamente después de la inoculación, mientras comenzó a desarrollarse la biocostra temprana dominada por cianobacterias. A los seis meses después de la inoculación, se observó una disminución de su cobertura y un aumento en el desarrollo de biocostras sucesivas (biocostra oscura y liquen).

Sin embargo, estos cambios en los parámetros evaluados dependen directamente de la composición de la comunidad microbiana, en la cual se obtuvo una mayor abundancia de Firmicutes en tratamientos expuestos a grandes pulsos de riego. El funcionamiento de la recuperación de la biocostra y su efecto en el suelo, principalmente en las concentraciones de micronutrientes (Fe, Mn, Zn and Cu), bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , and K^+), pH, C y N, no presentaron cambios en el tipo de biocostra y riego; sin embargo, incrementaron su concentración seis meses después de la inoculación. Conocer el proceso de recuperación de la biocostra en el marco de la restauración de zonas áridas, no solo contribuye a la recuperación de la funcionalidad del suelo degradado, sino también en los servicios ecosistémicos y su relación con las comunidades locales que habitan en el sistema socioecológico. Esto permite involucrar el enfoque socio-ecológico, para abordar la relación entre la biocostra y las actividades socio-económicas como la ganadería, el ecoturismo y la conservación, así como los valores estéticos y culturales, destacando el conocimiento local, los cuáles son aspectos importantes para la comunidad local del Ejido “La Flor”, en la Reserva de la Biosfera de Mapimí.

En el capítulo 2, se abordó el proceso de co-diseño de infografías con la comunidad local del Ejido “La Flor”, demostrando ser una herramienta efectiva para comunicar los beneficios de las biocostras y fomentar la participación activa entre los actores locales, incluyendo los pobladores y las organizaciones civiles, las cuáles participan en el desarrollo de estrategias que integran el conocimiento local con datos científicos, para desarrollar acciones que promuevan la restauración de ecosistemas y su conservación. El proceso de co-diseño de infografías, ha permitido a la comunidad local comprender cómo las biocostras contribuyen a la disminución de la erosión del suelo y la formación de “barreales”, las cuáles favorecen

la adherencia de las partículas del suelo; y, por otro lado, facilita el desarrollo de herramientas educativas que, al ser integradas en las actividades del ecoturismo, pueden atraer a turistas interesados en la biodiversidad y la conservación de ecosistemas. Este enfoque participativo no solo enriquece la experiencia educativa de los visitantes, sino que también promueve que la comunidad local participe activamente en la divulgación de la importancia de las biocostras en el ecosistema. Adicionalmente, al presentar la información de manera visual y articulada, permite que los grupos de interés comprendan rápidamente la relevancia de la información, apoyando así argumentos y decisiones fundamentadas en evidencia científica. Este enfoque puede fomentar discusiones constructivas y colaborativas sobre la conservación de las biocostras y el manejo sostenible de las zonas áridas. Los resultados de esta tesis proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y prácticas de restauración, sugiriendo que la inoculación de biocostras locales puede ser una estrategia efectiva y eficiente para promover la restauración de sistemas socio ecológicos en zonas áridas y semiáridas degradadas, así como la rehabilitación de servicios ecosistémicos y enfrentar los desafíos de la degradación de la tierra y la desertificación.

5.0 Anexos

Anexos capítulo 1.

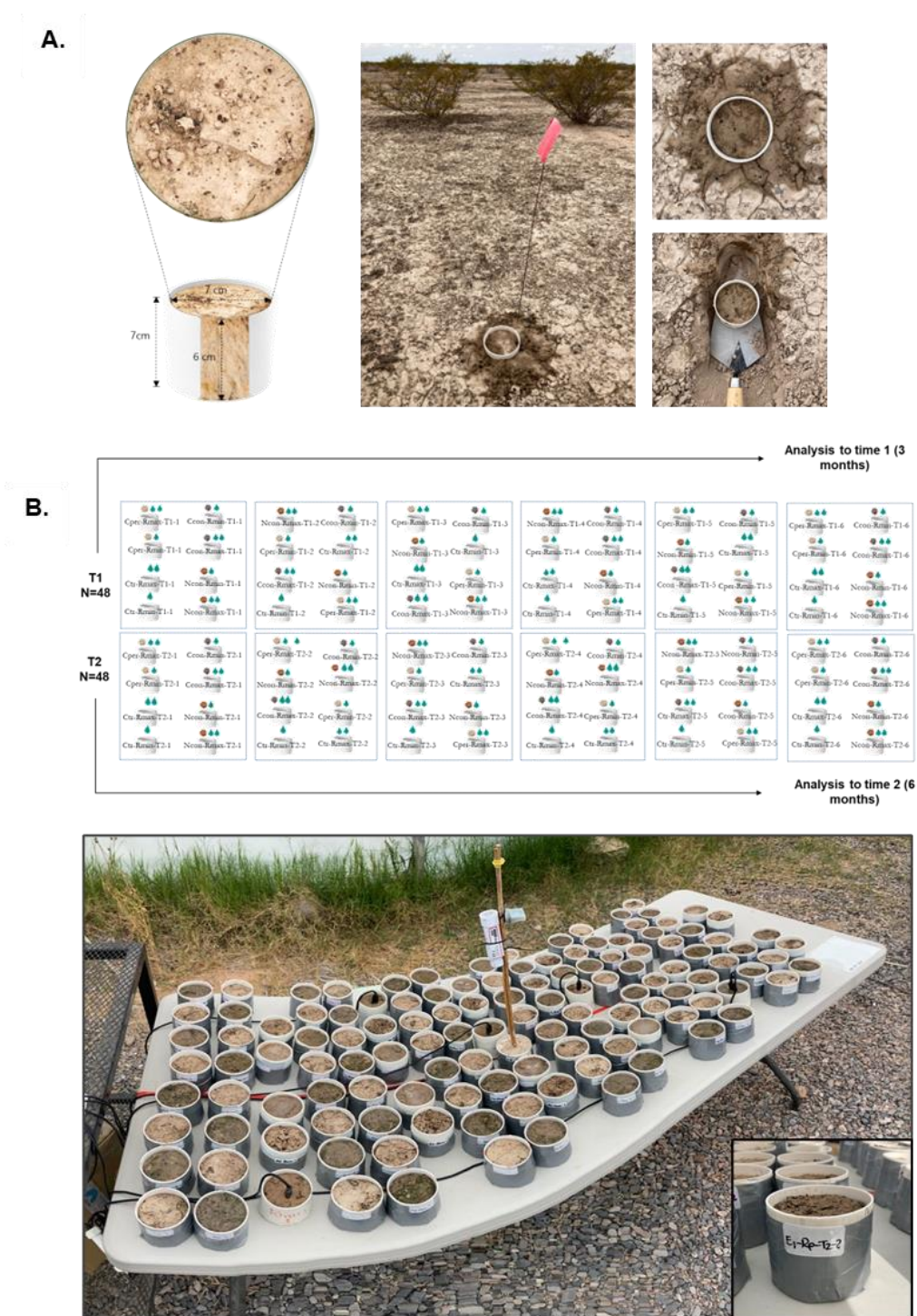


Fig. A 1. Installation and random distribution for experiment. A. Size of soil core and process of collection soil samples in the study of area. B. arrangement and labeling of soil cores according to the experimental design treatments.



Fig. A 2. Monthly development of biocrust in disturbed soil microcosm inoculated with different inoculants of biocrust under maximum and minimum irrigation conditions.

Table A 1. Summary Generalized Linear Models (GLM; t-family distribution) for bare soil decreased.

<i>Predictors</i>	<i>Estimates</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>
(Intercept)	20.67	16.42 – 24.92	<0.001
Inocula [LCdis]	1.06	-4.68 – 7.34	0.805
Inocula [LCcon]	0.87	-8.68 – 3.34	0.601
Inocula [BCcon]	0.87	-8.68 – 3.34	0.601
Time [3]	0.00	-26.68 – -14.66	0.999
Time [6]	0.00	-26.68 – -14.66	0.999
Irrigation [Min]	1.10	-4.01 – 8.01	0.713
Inocula [LCdis] * Time [3]	0.12	-9.83 – 7.17	1.000
Inocula [LCcon] * Time [3]	1.20	-5.83 – 11.17	1.000
Inocula [BCcon] * Time [3]	3.33	-5.17 – 11.83	0.999
Inocula [LCdis] * Time [6]	0.13	-9.83 – 7.17	1.000
Inocula [LCcon] * Time [6]	0.17	-5.83 – 11.17	1.000
Inocula [BCcon] * Time [6]	0.19	-5.83 – 11.17	1.000
Inocula [LCdis] * Irrigation [Min]	0.77	-13.83 – 3.17	0.476
Inocula [LCcon] * Irrigation [Min]	0.98	-9.17 – 7.83	0.955
Inocula [BCcon] * Irrigation [Min]	0.71	-14.50 – 2.50	0.368
Time [3] * Irrigation [Min]	1.00	-10.50 – 6.50	1.000
Time [6] * Irrigation [Min]	0.40	-10.50 – 6.50	1.000
(Inocula [LCdis] * Time [3]) * Irrigation Min]	0.87	-6.69 – 17.35	1.000
(Inocula [LCcon] * Time [3]) * Irrigation Min]	2	-10.02 – 14.02	0.999
(Inocula [BCcon] * Time [3]) * Irrigation Min]	1.28	-6.02 – 18.02	1.000
(Inocula [LCdis] * Time [6]) * Irrigation [Min]	2.29	-6.69 – 17.35	1.000
(Inocula [LCcon] * Time [6]) * Irrigation Min]	1.98	-11.35 – 12.69	1.000
(Inocula [BCcon] * Time [6]) * Irrigation Min]	2.52	-6.02 – 18.02	1.000
Observations	144		
R ² conditional / R ² marginal	NA / 0.993		

Table A 2. Summary Generalized Linear Models (GLM; t-family distribution) for light crust cover.

<i>Predictors</i>	<i>Estimates</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>
(Intercept)	82.25	77.07 – 87.43	<0.001
Inocula [LCdis]	-9.46	-17.56 – -1.37	0.022
Inocula [LCcon]	-0.25	-8.48 – 7.98	0.953
Inocula [BCcon]	0.47	-7.02 – 7.96	0.902
Time [3]	9.66	2.58 – 16.73	0.007
Time [6]	-16.92	-25.03 – -8.81	<0.001
Irrigation [Min]	-1.50	-8.55 – 5.56	0.678
Inocula [LCdis] * Time [3]	-14.12	-24.39 – -3.86	0.007
Inocula [LCcon] * Time [3]	-13.18	-24.04 – -2.32	0.017
Inocula [BCcon] * Time [3]	1.90	-7.76 – 11.56	0.700
Inocula [LCdis] * Time [6]	4.00	-9.01 – 17.01	0.547
Inocula [LCcon] * Time [6]	-8.92	-20.44 – 2.60	0.129
Inocula [BCcon] * Time [6]	-7.11	-18.83 – 4.61	0.234
Inocula [LCdis] * Irrigation [Min]	11.16	-0.48 – 22.80	0.060
Inocula [LCcon] * Irrigation [Min]	-0.50	-11.09 – 10.08	0.926
Inocula [BCcon] * Irrigation [Min]	3.53	-6.27 – 13.34	0.480
Time [3] * Irrigation [Min]	8.33	-0.94 – 17.60	0.078
Time [6] * Irrigation [Min]	33.89	23.75 – 44.03	<0.001
(Inocula [LCdis] * Time [3]) * Irrigation [Min]	6.28	-8.37 – 20.94	0.401
(Inocula [LCcon] * Time [3]) * Irrigation [Min]	11.68	-2.19 – 25.55	0.099
(Inocula [BCcon] * Time [3]) * Irrigation [Min]	-5.81	-18.26 – 6.65	0.361
(Inocula [LCdis] * Time [6]) * Irrigation [Min]	-14.85	-31.34 – 1.64	0.078
(Inocula [LCcon] * Time [6]) * Irrigation [Min]	5.60	-9.18 – 20.37	0.458
(Inocula [BCcon] * Time [6]) * Irrigation [Min]	0.16	-14.57 – 14.90	0.983
Observations			144
R ² conditional / R ² marginal			NA/ 0.994

Table A 3. Summary linear regression model (LM) for black crust cover.

<i>Predictors</i>	<i>Estimates</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>
(Intercept)	-0.00	-9.41 – 9.41	1.000
Inocula [LCdis]	-0.00	-13.31 – 13.31	1.000
Inocula [LCcon]	0.00	-13.31 – 13.31	1.000
Inocula [BCcon]	-0.00	-13.31 – 13.31	1.000
Time [3]	2.67	-10.65 – 15.98	0.692
Time [6]	24.67	11.35 – 37.98	<0.001
Irrigation [Min]	0.00	-13.31 – 13.31	1.000
Inocula [LCdis] * Time [3]	20.00	1.17 – 38.83	0.038
Inocula [LCcon] * Time [3]	8.67	-10.16 – 27.49	0.364
Inocula [BCcon] * Time [3]	-1.33	-20.16 – 17.49	0.889
Inocula [LCdis] * Time [6]	9.33	-9.49 – 28.16	0.328
Inocula [LCcon] * Time[6]	9.33	-9.49 – 28.16	0.328
Inocula [BCcon] * Time [6]	18.67	-0.16 – 37.49	0.052
Inocula [LCdis] * Irrigation [Min]	-0.00	-18.83 – 18.83	1.000
Inocula [LCcon] * Irrigation [Min]	0.67	-18.16 – 19.49	0.944
Inocula [BCcon] * Irrigation [Min]	0.00	-18.83 – 18.83	1.000
Time [3] * Irrigation [Min]	-1.33	-20.16 – 17.49	0.889
Time [6] * Irrigation [Min]	-22.00	-40.83 – -3.17	0.022
(Inocula [LCdis] * Time [3]) * Irrigation [Min]	-1.33	-27.96 – 25.29	0.921
(Inocula [LCcon] * Time [3]) * Irrigation [Min]	-9.33	-35.96 – 17.29	0.489
(Inocula [BCcon] * Time [3]) * Irrigation [Min]	-0.00	-26.62 – 26.62	1.000
(Inocula [LCdis] * Time [6]) * Irrigation [Min]	-0.67	-27.29 – 25.96	0.961
(Inocula [LCcon] * Time [6]) * Irrigation [Min]	-4.67	-31.29 – 21.96	0.729
(Inocula [BCcon] * Time [6]) * Irrigation [Min]	-17.33	-43.96 – 9.29	0.200
Observations	144		
R ² / R ² adjusted	0.595 / 0.518		

Table A 4. Summary linear regression model (LM) for lichen cover.

<i>Predictors</i>	<i>Estimates</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>
(Intercept)	-0.00	-3.01 – 3.01	1.000
Inocula [LCdis]	1.33	-2.92 – 5.59	0.536
Inocula [LCcon]	0.00	-4.25 – 4.25	1.000
Inocula [BCcon]	-0.00	-4.25 – 4.25	1.000
Time [3]	4.00	-0.25 – 8.25	0.065
Time [6]	2.67	-1.59 – 6.92	0.217
Irrigation [Min]	0.00	-4.25 – 4.25	1.000
Inocula [LCdis] * Time [3]	-1.33	-7.35 – 4.68	0.662
Inocula [LCcon] * Time [3]	6.00	-0.02 – 12.02	0.051
Inocula [BCcon] * Time [3]	-0.67	-6.68 – 5.35	0.827
Inocula [LCdis] * Time [6]	9.33	3.32 – 15.35	0.003
Inocula [LCcon] * Time [6]	8.00	1.98 – 14.02	0.010
Inocula [BCcon] * Time [6]	2.00	-4.02 – 8.02	0.512
Inocula [LCdis] * Irrigation [Min]	-1.33	-7.35 – 4.68	0.662
Inocula [LCcon] * Irrigation [Min]	0.00	-6.02 – 6.02	1.000
Inocula [BCcon] * Irrigation [Min]	0.00	-6.02 – 6.02	1.000
Time [3] * Irrigation [Min]	-3.33	-9.35 – 2.68	0.275
Time [6] * Irrigation [Min]	-2.67	-8.68 – 3.35	0.382
(Inocula [LCdis] * Time [3]) * Irrigation [Min]	6.00	-2.51 – 14.51	0.165
(Inocula [LCcon] * Time [3]) * Irrigation [Min]	-2.67	-11.17 – 5.84	0.536
(Inocula [BCcon] * Time [3]) * Irrigation [Min]	0.67	-7.84 – 9.17	0.877
(Inocula [LCdis] * Time [6]) * Irrigation [Min]	-5.33	-13.84 – 3.17	0.217
(Inocula [LCcon] * Time [6]) * Irrigation [Min]	-4.67	-13.17 – 3.84	0.280
(Inocula [BCcon] * Time [6]) * Irrigation [Min]	-0.00	-8.51 – 8.51	1.000
Observations	144		
R ² / R ² adjusted	0.531 / 0.441		

Table A 5. ANOVA of physicochemical properties of soil. Three-way ANOVA values was performed for inocula, irrigation, and time of inoculation variables (*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$).

Predictor	<i>pH</i>	<i>Df</i>	<i>Sum Sq</i>	<i>Mean Sq</i>	<i>F value</i>	<i>Pr(>F)</i>	
Inocula		3	0.1164	0.0388	7.333	0.00021	***
Irrigation		1	0.0754	0.0754	14.243	0.000307	***
Time		1	1.3514	1.3514	255.348	< 2e-16	***
Inocula*Irrigation		3	0.0373	0.0124	2.348	0.078763	.
Inocula*Time		3	0.0334	0.0111	2.106	0.105988	
Irrigation*Time		1	0.0148	0.0148	2.787	0.098925	.
Inocula*Irrigation*Time		3	0.064	0.0213	4.032	0.010055	*
Residuals		80	0.4234	0.0053			
<i>ds</i>							
Inocula		3	394	131	7.533	0.000168	***
Irrigation		1	358	358	20.581	1.99E-05	***
Time		1	4180	4180	240.034	< 2e-16	***
Inocula*Irrigation		3	185	62	3.539	0.018308	*
Inocula*Time		3	65	22	1.239	0.301101	
Irrigation*Time		1	137	137	7.869	0.006312	**
Inocula*Irrigation*Time		3	86	29	1.654	0.183477	
Residuals		80	1393	17			
<i>Ca</i>							
Inocula		3	330.5	110.2	4.009	0.0103	*
Irrigation		1	27.1	27.1	0.985	0.3239	
Time		1	823.4	823.4	29.957	4.93E-07	***
Inocula*Irrigation		3	70.7	23.6	0.858	0.4667	
Inocula*Time		3	124.2	41.4	1.506	0.2193	
Irrigation*Time		1	8.8	8.8	0.32	0.5729	
Inocula*Irrigation*Time		3	177.7	59.2	2.156	0.0998	.
Residuals		80	2198.8	27.5			
<i>Cu</i>							
Inocula		3	0.01691	0.00564	15.738	3.92E-08	***
Irrigation		1	0.00097	0.00097	2.722	0.1029	
Time		1	0.08082	0.08082	225.686	< 2e-16	***
Inocula*Irrigation		3	0.0036	0.0012	3.35	0.0231	*
Inocula*Time		3	0.02579	0.0086	24.009	3.53E-11	***
Irrigation*Time		1	0.00141	0.00141	3.95	0.0503	.
Inocula*Irrigation*Time		3	0.00086	0.00029	0.801	0.497	
Residuals		80	0.02865	0.00036			

Fe						
Inocula	3	0.827	0.276	25.273	1.74E-11	***
Irrigation	1	0.12	0.12	11.027	0.00137	**
Time	1	3.604	3.604	330.526	< 2e-16	***
Inocula*Irrigation	3	0.034	0.011	1.049	0.37564	
Inocula*Time	3	0.661	0.22	20.21	9.28E-10	***
Irrigation*Time	1	0.006	0.006	0.58	0.44876	
Inocula*Irrigation*Time	3	0.043	0.014	1.306	0.27844	
Residuals	77	0.84	0.011			

K						
Inocula	3	216	72.01	2.094	0.108	
Irrigation	1	2.4	2.42	0.07	0.792	
Time	1	17.8	17.8	0.518	0.474	
Inocula*Irrigation	3	181.3	60.44	1.758	0.162	
Inocula*Time	3	40.7	13.56	0.394	0.757	
Irrigation*Time	1	89.4	89.36	2.599	0.111	
Inocula*Irrigation*Time	3	107.9	35.97	1.046	0.377	
Residuals	80	2750.7	34.38			

Mg						
Inocula	3	4.109	1.3698	3.641	0.0162	*
Irrigation	1	0.048	0.0477	0.127	0.7226	
Time	1	2.174	2.174	5.779	0.0185	*
Inocula*Irrigation	3	0.587	0.1957	0.52	0.6696	
Inocula*Time	3	2.375	0.7917	2.104	0.1062	
Irrigation*Time	1	1.474	1.4743	3.919	0.0512	.
Inocula*Irrigation*Time	3	1.453	0.4843	1.287	0.2845	
Residuals	80	30.095	0.3762			

Mn						
Inocula	3	15.14	5.05	16.601	1.78E-08	***
Irrigation	1	0	0	0.004	0.952171	
Time	1	118.64	118.64	390.195	< 2e-16	***
Inocula*Irrigation	3	0.51	0.17	0.56	0.6431	
Inocula*Time	3	11.37	3.79	12.468	9.04E-07	***
Irrigation*Time	1	3.77	3.77	12.409	0.000709	***
Inocula*Irrigation*Time	3	2.08	0.69	2.285	0.085171	.
Residuals	80	24.32	0.3			

Na						
Inocula	3	1.16	0.3868	0.191	0.902	
Irrigation	1	0.76	0.7573	0.374	0.543	
Time	1	2.33	2.3298	1.151	0.287	
Inocula*Irrigation	3	6.23	2.0763	1.025	0.386	
Inocula*Time	3	1.82	0.6053	0.299	0.826	
Irrigation*Time	1	2.78	2.7813	1.374	0.245	
Inocula*Irrigation*Time	3	5.36	1.7851	0.882	0.454	
Residuals	80	161.99	2.0249			

Zn						
Inocula	3	0.02233	0.00744	10.033	1.20E-05	***
Irrigation	1	0.00312	0.00312	4.202	0.0438	*
Time	1	0.05715	0.05715	77.05	3.56E-13	***

Inocula*Irrigation	3	0.00105	0.00035	0.47	0.7043	
Inocula*Time	3	0.019	0.00633	8.541	5.87E-05	***
Irrigation*Time	1	0.00247	0.00247	3.327	0.0721	.
Inocula*Irrigation*Time	3	0.00101	0.00034	0.454	0.7154	
Residuals	76	0.05637	0.00074			
C						
Inocula	3	57.3	19.099	1.019	0.389	
Irrigation	1	17.3	17.34	0.925	0.339	
Time	1	11.1	11.07	0.591	0.444	
Inocula*Irrigation	3	65.1	21.709	1.158	0.331	
Inocula*Time	3	59.4	19.807	1.057	0.372	
Irrigation*Time	1	31.1	31.054	1.657	0.202	
Inocula*Irrigation*Time	3	24.5	8.176	0.436	0.728	
Residuals	80	1499.5	18.744			
N						
Inocula	3	1.36	0.4534	1.028	0.385	
Irrigation	1	0	0.0009	0.002	0.963	
Time	1	1.28	1.2834	2.909	0.092	.
Inocula*Irrigation	3	0.08	0.0251	0.057	0.982	
Inocula*Time	3	1.75	0.582	1.319	0.274	
Irrigation*Time	1	0.68	0.6834	1.549	0.217	
Inocula*Irrigation*Time	3	0.71	0.237	0.537	0.658	
Residuals	80	35.3	0.4413			

Anexos capítulo 2.

Tabla A 1. Cuestionario de evaluación interna para cada una de las infografías co-diseñadas.

Participantes:	Integrantes del co-diseño, diseñador y/o facilitador, comunidad del ejido “La Flor” y miembros de la organización civil CONANP y PRONATURA.			
Propósito:	Evaluar la estructura, coherencia, claridad, lenguaje accesible, integración del tema, en el co-diseño de la infografía para comunicar las funciones de la biocostra en el sistema socio-ecológico del Ejido “La Flor”.			
Indicaciones:	Los participantes del co-diseño evaluaron los elementos comunicativos en escala cualitativa para cada una de las infografías en el proceso de co-diseño.			
Nombre de la infografía evaluada:		Nombre del evaluador:		
Elementos comunicativos	Pregunta	Evaluación		
		Excelente	Bueno	Suficiente
		Insuficiente		
Estructura	¿Qué tal te pareció el contenido de la infografía?			
Lenguaje apropiado	¿Los elementos visuales utilizados en la infografía son claros y fáciles de entender?			
Integración temática	¿La infografía sigue una estructura lógica y coherente en la presentación de la información?			
Diseño visual	¿Qué tan atractiva consideras que es la infografía?			
Comunicación y propósito	¿La infografía logra comunicar la información de manera efectiva?			
¿Consideras que la infografía puede ayudar en los recorridos guiados, como parte del ecoturismo?		(Escribe respuesta)		
¿Crees que la biocostra pueda ser de interés para el visitante?		(Escribe respuesta)		
¿El tema de biocostra se explicó con claridad en la infografía?		(Escribe respuesta)		

Tabla A 2. Evaluación externa para la comprensión de cada una de las infografías co-diseñadas.

Participantes:	Público en general, clasificado en estudiantes, investigadores, organización gubernamental y de la sociedad civil y del sector privado.											
Propósito:	Determinar si la infografía transmite la información de manera clara y estructurada, así como el entendimiento sobre el papel que desempeña la biocostra en el ecosistema.											
Selecciona el tipo de público al que perteneces:												
Investigador (a)	Estudiante											
Gobierno	Organización de la sociedad civil											
Sector Privado	Otro: (especificar)											
Nombre y título de la infografía:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. ¿Es fácil de entender la información presentada?												
2. La información ¿es clara y concisa?												
3. ¿La infografía utiliza gráficos, imágenes u otros elementos visuales para apoyar la información?												
4. ¿La infografía utiliza colores, tipografías y otros elementos visuales de manera coherente y atractiva?												
5. ¿La infografía tiene un diseño equilibrado y utiliza el espacio de manera efectiva?												
6. ¿La infografía presenta la información de manera organizada y estructurada?												
7. ¿La infografía proporciona una visión general clara y concisa del tema tratado?												
8. ¿La infografía muestra de manera efectiva la relación entre diferentes conceptos?												
9. ¿Te parece adecuado el equilibrio entre el texto y la cantidad de gráficos?												
10. ¿Los gráficos y fotografías mejoraron tu comprensión del tema?												
a. ¿Qué elementos te gustaría incluir en las infografías?	(Escribe respuesta)											
b. En el siguiente espacio, ¿podrías proporcionarnos un comentario final sobre las infografías revisadas?	(Escribe respuesta)											

Evaluación

El rango de evaluación para esta evaluación se consideró bajo los siguientes criterios de evaluación (Anguita *et al.*, 2003; Fraenkel *et al.*, 2011):

- No está presente (0-2)
 - 0: Completamente ausente, no se ha abordado el aspecto evaluado.
 - 1: Apenas presente, casi no se ha abordado el aspecto evaluado.
 - 2: Presente de manera muy mínima, casi imperceptible.
- Insuficiente (3-4)
 - 3: Presente pero inadecuado, no cumple con las expectativas mínimas.
 - 4: Presente, pero con muchas deficiencias, apenas cumple con las expectativas mínimas.
- Suficiente (5-6)
 - 5: Adecuado pero básico, cumple con las expectativas mínimas.
 - 6: Suficiente, cumple con las expectativas de manera aceptable, pero sin destacar.
- Bueno (7-8)
 - 7: Bueno, cumple bien con las expectativas, con pocas deficiencias.
 - 8: Muy bueno, cumple notablemente con las expectativas, con pocos puntos de mejora.
- Excelente (9-10)
 - 9: Excelente, supera las expectativas, con mínimos puntos de mejora.
 - 10: Sobresaliente, cumple y excede todas las expectativas sin ningún punto de mejora