

CARACTERIZACIÓN TAXONÓMICA DE LAS BIOCOSTRAS DEL SALADAR DE CORDOVILLA A LO LARGO DE UN GRADIENTE DE SALINIDAD

TAXONOMIC CHARACTERIZATION OF SOIL BIOCRUSTS IN THE SALT MARSH OF CORDOVILLA ALONG A SALINITY GRADIENT

**Joaquín MORENO COMPAÑ^{1,*}, Cristina ROBLES ANIORTE¹,
Mario ORTEGA VICEDO¹ y Sergio MARTÍNEZ MOLINA¹**

Recibido: 9 de junio de 2025

Aceptado: 18 de septiembre de 2025

Cómo citar:

Moreno Compañ, J., Robles Anierte, C., Ortega Vicedo, M. y Martínez Molina, S. (2025). Caracterización taxonómica de las biocostras del saladar de Cordovilla a lo largo de un gradiente de salinidad. *Sabuco*, 19: xx-xx. http://doi.org/10.37927/sabuco.19_9

RESUMEN

Las biocostras son comunidades formadas por cianobacterias, algas y líquenes que habitan en la superficie del suelo. Actualmente, las biocostras ocupan un 12 % del suelo a nivel mundial, apareciendo principalmente en zonas áridas y semiáridas. Sin embargo, estas comunidades han sido poco estudiadas en ambientes salinos albacetenses. Así, el objetivo de este trabajo es identificar la composición de la biocostra en el saladar de Cordovilla, así como su relación con distintas salinidades y comunidades vegetales asociadas. Para ello, se recolectaron muestras de biocostra a lo largo del gradiente de salinidad en cada una de las seis comunidades vegetación dominantes y en suelo desnudo, las cuales posteriormente se procesaron y estudiaron en el laboratorio. Los géneros de cianobacterias identificados en la zona de estudio fueron *Lyngbya sp.*, *Gloeocapsa sp.*, *Microcoleus sp.*, *Oscillatoria sp.*, *Phormidium sp.* y *Pseudanabaena sp.* Estas se localizaron a lo largo del gradiente de salinidad, asociadas a diferentes comunidades vegetales. Por un lado, *Microcoleus sp.*, *Lyngbya sp.* y *Oscillatoria sp.* aparecieron en franjas dominadas por *Salicornia fruticosa*, mientras que *Gloeocapsa sp.*, *Microcoleus sp.*, *Lyngbya sp.* y *Oscillatoria sp.* estuvieron vinculadas con *Arthrocaulon macrostachyum*. Por otro lado, *Gloeocapsa sp.*, *Microcoleus sp.*, *Lyngbya sp.* y *Oscillatoria sp.* se localizaron en las bandas de *Limonium cossonianum*. Finalmente, en las bandas dominadas por *Lygeum spartum* y *Limonium caesium* se identificaron *Gloeocapsa sp.*, *Microcoleus sp.*, *Oscilla-*

¹ Universidad Miguel Hernández de Elche

* Autor para la correspondencia: joaquin.morenoc@umh.es

toria sp., *Phormidium sp.* y *Pseudanabaena sp.* Estos datos fueron apoyados por los resultados obtenidos por el análisis de conglomerados y el análisis de componentes principales.

Palabras clave: ambiente salino, cianobacteria, costra biológica, gradiente de salinidad, halófitos, zonación de comunidades.

ABSTRACT

Biocrusts are communities composed of cyanobacteria, algae, and lichens that inhabit the soil surface. Currently, biocrusts cover approximately 12 % of the Earth's land surface, occurring primarily in arid and semiarid regions. However, these communities have been scarcely studied in saline environments within the province of Albacete. The aim of this study is to identify the composition of the biocrust in the Saltmarsh of Cordovilla, as well as its relationship with varying salinity levels and associated plant communities. For this purpose, biocrust samples were collected along the salinity gradient through the six dominant vegetation communities and in bare soil. These samples were subsequently processed and analysed in the laboratory. The cyanobacterial genera identified in the study area were *Lyngbya sp.*, *Gloeocapsa sp.*, *Microcoleus sp.*, *Oscillatoria sp.*, *Phormidium sp.* and *Pseudanabaena sp.* These taxa were distributed along the salinity gradient and associated with different plant communities. On the one hand, *Microcoleus sp.*, *Lyngbya sp.* and *Oscillatoria sp.* were found in zones dominated by *Salicornia fruticosa*, while *Gloeocapsa sp.*, *Microcoleus sp.*, *Lyngbya sp.* and *Oscillatoria sp.* were linked to *Arthrocaulon macrostachyum*. On the other hand, *Gloeocapsa sp.*, *Microcoleus sp.*, *Lyngbya sp.* and *Oscillatoria sp.* were observed in areas dominated by *Limonium cossonianum*. Finally, in zones dominated by *Lygeum spartum* and *Limonium caesium*, the identified genera included *Gloeocapsa sp.*, *Microcoleus sp.*, *Oscillatoria sp.*, *Phormidium sp.*, and *Pseudanabaena sp.* These patterns were supported by the results of cluster analysis and principal component analysis.

Key words: biological soil crust, community zonation, cyanobacteria, halophytes, saline environment, salinity gradient.

1. INTRODUCCIÓN

Las biocostras, también denominadas costras biológicas del suelo, constituyen comunidades complejas integradas tanto por organismos fotoautó-

trofos (*i. e.*, cianobacterias, algas, líquenes y briófitos) que colonizan la capa superficial, como por organismos heterótrofos descomponedores (*i. e.*, bacterias, hongos y arqueas) y otros heterótrofos que se alimentan de estos (*i. e.*, protozoos, nematodos y microartrópodos) (Belnap y Lange, 2003; Weber *et al.*, 2022). Las biocostras tienen la capacidad de permanecer en estado inactivo durante períodos de sequía extrema sin sufrir daños, y pueden reactivar rápidamente sus funciones metabólicas ante la presencia de pequeñas cantidades de humedad en el aire o agua superficial (Belnap, 2006). La comunidad de biocostras, que abarca tanto productores primarios como diversos consumidores en la red trófica, suele estar compuesta por cientos de especies (Bowker *et al.*, 2010; Martínez Catena, 2020). Por ello, considerarlas como comunidades simples sería una visión reduccionista, ya que su biodiversidad puede ser comparable a la de comunidades de plantas vasculares en ambientes áridos y semiáridos (Bowker *et al.*, 2018), siendo estas capaces de crecer y expandirse de manera irregular a lo largo del año (Belnap, 2006).

Según estudios recientes, las biocostras cubren aproximadamente el 12 % de la superficie terrestre del planeta (Rodríguez-Caballero *et al.*, 2018), predominando en ambientes de baja productividad, como regiones áridas y semiáridas (Belnap y Gardner, 1993; Gold y Bliss, 1995), y pudiendo ocupar cerca del 70 % del suelo en las áreas donde se encuentran (Belnap y Lange, 2003). En este contexto, las costras biológicas del suelo constituyen una parte de la biomasa microbiana más productiva del planeta, localizándose en zonas sin vegetación y desempeñando un papel fundamental en el funcionamiento y la dinámica de los ecosistemas áridos y semiáridos (Maestre *et al.*, 2006). Además, estas comunidades actúan como importantes bioindicadores de procesos de desertificación y son consideradas como agentes iniciales en la recuperación de la estabilidad y fertilidad del suelo, facilitando el restablecimiento de coberturas vegetales en áreas degradadas en recuperación (Bowker, 2007). Sin embargo, una de sus características más conocidas es su alta vulnerabilidad ante perturbaciones del hábitat, acompañada de una recuperación lenta (Belnap y Lange, 2003). Es más, las biocostras muestran una respuesta rápida ante factores estresantes, como el sobrepastoreo o el cambio climático (Reed *et al.*, 2012; Maestre *et al.*, 2013; Darrouzet-Nardi *et al.*, 2015; Ferremberg *et al.*, 2015); ello deriva en alteraciones en la composición y abundancia de especies que participan en los ciclos de nutrientes e hidrológicos, así como una reducción de la cobertura vegetal, lo que afecta las funciones del ecosistema en zonas áridas y semiáridas (Bowker *et al.*, 2018).

Dentro de los ecosistemas semiáridos del sureste de la península ibérica, el saladar de Cordovilla destaca como uno de los enclaves de mayor relevancia ecológica en la provincia de Albacete. Este entorno salino se localiza en los términos municipales de Hellín y Tobarra, integrándose en la Zona de Especial Conservación (ZEC) “Saladares de Cordovilla y Agramón y laguna

de Alboraj” (ES4210011) (Dirección General de Política Forestal y Espacios Naturales, 2015). Se trata de un espacio de alto valor ecológico que alberga un hábitat singular y representativo, contribuyendo significativamente a la heterogeneidad del paisaje y figurando entre los saladares interiores mejor conservados de España (Valdés *et al.*, 1993). La importancia ecológica de este ecosistema ha motivado la realización de diversos estudios centrados en su vegetación, flora, procesos ecológicos y características químicas del medio (Cirujano, 1990; Valdés *et al.*, 1993; Terrones *et al.*, 2016; Moreno *et al.*, 2018, entre otros). Estos trabajos han puesto de manifiesto una estrecha relación entre el gradiente de salinidad y la presencia de comunidades vegetales halófitas características. No obstante, hasta la fecha no se dispone de investigaciones que aborden en profundidad la composición y distribución de las biocostras edáficas presentes en el saladar de Cordovilla. En este sentido, resulta necesario analizar la diversidad taxonómica de estas comunidades en relación con el gradiente de salinidad, con el fin de ampliar el conocimiento sobre su papel ecológico en este tipo de ambientes.

A partir de lo expuesto, este trabajo se centra en la caracterización de la composición taxonómica de las comunidades de biocostra presentes en los suelos del saladar de Cordovilla a lo largo de un gradiente de salinidad. Así, el objetivo principal de este estudio es aportar los primeros datos sobre los organismos que conforman estas biocostras —como cianobacterias, algas, líquenes y musgos— y su relación con las distintas concentraciones de salinidad y las comunidades vegetales asociadas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio y muestreo de campo

Los muestreos de campo se llevaron a cabo entre los meses de abril y septiembre de 2024 en la Zona de Especial Conservación (ZEC) “Saladares de Cordovilla y Agramón y Laguna de Alboraj” (ES4210011), ubicada en los términos municipales de Hellín y Tobarra (provincia de Albacete) y con una extensión de 294,76 Ha. Este ambiente se localiza en el piso bioclimático mesomediterráneo semiárido, al sureste de la provincia de Albacete (Rivas-Martínez, 2007). La temperatura media anual de la zona es de c. 14,4°C y el total anual de precipitaciones registrado es de 324,2 mm, aunque los meses de abril-mayo y octubre-noviembre muestren precipitaciones más abundantes. La temperatura media durante el mes más cálido (julio) es de 25,5°C, mientras que la temperatura media del mes más frío (enero) es de 6,65°C, según los datos históricos de la estación meteorológica de Tobarra (Valdés *et al.*, 1993; Rivas-Martínez, 2007). Esta ZEC comprende tres siste-

mas salinos conectados por una red fluvial: la laguna de Alboraj, el saladar de Cordovilla y el saladar de Agramón. No obstante, el presente estudio se centró exclusivamente en el saladar de Cordovilla (38° 32' 15" N, 1° 36' 40" O), representando uno de los saladares de interior mejor conservados de España y que alberga poblaciones únicas de endemismos ibéricos (Dirección General de Política Forestal y Espacios Naturales, 2015). Además, según el Anexo I de la Directiva Hábitats en este enclave se localizan matorrales halófilos mediterráneos y termoatlánticos (*Sarcocornetea fruticosi*) (1420), pastizales salinos mediterráneos (*Juncetalia maritimae*) (1410) y estepas salinas mediterráneas (*Limonietalia*) (1510).

A lo largo del periodo primavera-verano (abril a septiembre), se realizaron cinco campañas de muestreo en el saladar de Cordovilla: (i) finales de abril, (ii) finales de mayo, (iii) inicios de julio, (iv) finales de julio y (v) comienzos de septiembre. Así, se realizaron muestreos en cinco periodos, evaluando en cada uno tres parcelas aleatorias de 100 × 100 m distribuidas a lo largo del gradiente de salinidad, incluyendo las bandas de vegetación dominadas por las siguientes especies: (i) *Salicornia fruticosa* (L.) L., (ii) *Arthrocaulon macrostachyum* (Moric.) Piirainen & G.Kadereit, (iii) *Limonium cossonianum* Kuntze, (iv) *Lygeum spartum* L. y (v) *Limonium caesium* (Girard) Kuntze. Las comunidades vegetales dominantes en las zonas más salinas están formadas por *Salicornia fruticosa* y *Arthrocaulon macrostachyum*, mientras que las zonas menos salinas están caracterizadas por formaciones de *Limonium cossonianum*, *Lygeum spartum* y *Limonium caesium* (Moreno *et al.*, 2018). De este modo, se muestrearon 15 parcelas por período incluyendo la amplia variabilidad de los diferentes tipos de hábitats de este ambiente; y la salinidad fue definida de forma categórica según la comunidad vegetal. Además, se realizó el mismo muestreo en una zona sin cobertura vegetal (suelo desnudo en condiciones de menor salinidad), que fue tratado como control fuera del gradiente salino. En total se realizaron 90 inventarios de biocostras (6 tipos de cubierta vegetal × 3 parcelas × 5 campañas de muestreo) en un área de c. 50 Ha, registrando para cada parcela los datos de cobertura general de la biocostra por transectos y la presencia/ausencia de perturbaciones antropogénicas. Además, se recolectaron muestras de suelo con biocostra de 10 × 10 cm y 1 cm de profundidad por parcela en cada fecha de muestreo. Estas muestras fueron almacenadas en placas Petri de 50 mm de diámetro para su transporte y protección, y posteriormente conservadas en seco en el laboratorio hasta su análisis (Campbell *et al.*, 2009).

2.2. Análisis de la composición de la biocostra

Las muestras de biocostras recolectadas fueron hidratadas utilizando agua destilada en el laboratorio del área de Botánica de la Universidad Mi-

guel Hernández de Elche (UMH). Los líquenes se identificaron taxonómicamente mediante observación microscópica, apoyándose en bibliografía especializada (e. g., Wirth, 2004). El resto de material se incubó en medio Bold's Basal enriquecido con hidróxido de potasio, con el fin de favorecer la solubilización de compuestos y la desagregación celular. Las muestras se mantuvieron en tubos de ensayo y se almacenaron en frascos con tapón de rosca, debidamente etiquetados, para facilitar el desarrollo y la posterior identificación de cianobacterias y algas (adaptado de Cano-Díaz *et al.*, 2018). El desarrollo de sus colonias fue evaluado mediante microscopía óptica, utilizando un objetivo de inmersión de 63x y una cámara de Neubauer para analizar la riqueza específica de las muestras. La identificación taxonómica de cianobacterias y algas se realizó siguiendo las claves de Komárek y Anagnostidis (1998, 2005), John *et al.* (2011) y Komárek (2013).

2.3. Análisis estadísticos

La riqueza de especies en cada uno de los sitios muestreados a lo largo del gradiente de salinidad fue registrada en términos de las especies observadas. Para evaluar la composición específica de las cianobacterias —el grupo más abundante en las muestras analizadas— se aplicaron análisis de conglomerados mediante el algoritmo *K-means*. Adicionalmente, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) con el objetivo de cuantificar el porcentaje de la varianza explicada por los principales componentes en la distribución de las cianobacterias a lo largo del gradiente salino (clasificado en alta, media y baja salinidad). Estos análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando las funciones *kmeans* y *prcomp*, respectivamente, del paquete *stats* en el software estadístico R v.4.2.2 (R Core Team, 2024). Para comparar la diversidad de cianobacterias presentes en las biocostras entre comunidades vegetales, se generaron curvas de rarefacción a partir de las muestras recolectadas. Esto permitió evaluar las diferencias en la composición de especies de biocostra en función de los grupos funcionales vegetales dominantes en cada sitio (*i. e.*, especies suculentas, excretoras de sal y especies con absorción selectiva de sales). Este análisis estadístico se hizo en el software estadístico R v.4.2.2 (R Core Team, 2024) usando la función *rarecurve* del paquete *vegan* (Oksanen, 2001). Finalmente se realizó un Análisis de Varianza Permutacional Multivariante (PERMANOVA) para evaluar si la composición de comunidades (*i. e.*, abundancia de especies) difería significativamente entre niveles de salinidad (*i. e.*, distintas comunidades vegetales a lo largo del gradiente de salinidad). Este análisis se realizó en el software estadístico R v.4.2.2 (R Core Team, 2024) usando la función *adonis2* del paquete *vegan* (Oksanen, 2001), en el cual la variable dependiente fue la composición de comunidades (*i. e.*, abundancias de especies) y la variable independiente fue el nivel de salinidad (*i. e.*, alto, medio, bajo).

3. RESULTADOS

En las muestras de biocostra recolectadas entre finales de abril y finales de julio se observaron exclusivamente algas unicelulares aisladas, predominantemente diatomeas pennales, distribuidas a lo largo de todo el gradiente de salinidad. Estas diatomeas estuvieron presentes tanto en suelos altamente salinos, asociados a comunidades de especies suculentas, como en suelos con menor salinidad, característicos de comunidades de especies no suculentas. Asimismo, se detectaron de forma esporádica colonias adultas aisladas de *Gloeocapsa* Kützinger 1843 en suelos de baja salinidad, concretamente en parcelas dominadas por *Limonium spp.*, *Lygeum spartum* y en áreas de suelo desnudo.

Las muestras de biocostra recolectadas a inicios de septiembre presentaron la mayor riqueza específica de cianobacterias registrada a lo largo de todo el gradiente de salinidad, las cuales fueron identificadas a nivel de género. Los géneros de cianobacterias identificados fueron:

1. *Gloeocapsa* Kützinger 1843. Orden Chroococcales (Familia Microcystaceae). Es una cianobacteria colonial. Presenta células aplanadas a lo largo de líneas de división, incrustadas en mucílago denso formado por capas concéntricas de vaina, cada una de las células corresponde a una ronda de división (figura 1A).

2. *Lyngbya* C. Agardh ex Gomont 1892. Orden Oscillatoriales (Familia Oscillatoriaceae). Presenta tricomas gruesos y rectos encerrados en una vaina firme que generalmente se encuentra en esteras. Los filamentos suelen ser no ramificados o, en ocasiones, con falsas ramificaciones. Las células son claramente más cortas que anchas (discoides). Las células apicales suelen tener una caliptra (pared exterior engrosada). Forman hormogonias móviles y no presenta heterocitos (figura 1B).

3. *Microcoleus* Desmazières ex Gomont 1892. Orden Oscillatoriales (Familia Phormidiaceae). Colonia de múltiples tricomas dentro de una vaina común, se puede encontrar como una cianobacteria colonial o filamentosa. Tricomas no ramificados ni ahusados que carecen de heterocitos y se encuentran en una disposición paralela delimitada por una vaina ancha común. Los tricomas individuales son móviles y se deslizan hacia adelante y hacia atrás uno sobre el otro. *Microcoleus sp.* puede ser tanto filamentoso (tricomas dentro de una vaina) como colonial (figura 1C).

4. *Oscillatoria* Vaucher ex Gomont 1892. Orden Oscillatoriales (Familia Oscillatoriaceae). Presenta tricomas (normalmente sin vaina, excepto bajo condiciones de estrés) ligeramente incrustados en las paredes transversales entre las células. Tricomas rígidos y rectos, o flexibles y curvados. Longitud y ancho de celda variable (al menos 2-20 μm) y relación longitud/ancho (al menos 0,1-10 μm) (figura 1D).

5. *Phormidium* Kützing ex Gomont 1892. Orden Oscillatoriales (Familia Phormidiaceae). Tiene tricomas que carecen de heterocito, no es ahusado y tiene una vaina que se extiende más allá del extremo de los tricomas (figura 1E).

6. *Pseudanabaena* Lauterborn 1915. Orden Pseudanabaenales (Familia Pseudanabaenaceae). Presenta filamentos solitarios o agrupados en esteras mucilagenosas. Células cilíndricas, ligeramente cortadas en las paredes transversales. Células terminales redondeadas o en forma de cono (figura 1F).



Figura 1. Cianobacterias identificadas en el saladar de Cordovilla a inicios de septiembre. **A**, *Gloeocapsa* Kützing 1843; **B**, *Lyngbya* C. Agardh ex Gomont 1892; **C**, *Microcoleus* Desmazières ex Gomont 1892; **D**, *Oscillatoria* Vaucher ex Gomont 1892; **E**, *Phormidium* Kützing ex Gomont 1892; **F**, *Pseudanabaena* Lauterborn 1915.

Las cianobacterias citadas anteriormente se localizaron en diferentes zonas a lo largo del gradiente de salinidad. Por un lado, en la franja dominada por *Salicornia fruticosa*, se observaron los géneros *Microcoleus* sp., *Lyngbya* sp. y *Oscillatoria* sp.; mientras que en la banda correspondiente a *Arthrocaulon macrostachyum* se identificaron *Gloeocapsa* sp., *Microcoleus* sp., *Lyngbya* sp. y *Oscillatoria* sp. (tabla 1). Por otro lado, en la franja de vegetación dominada por *Limonium cossonianum*, así como en zonas de

suelo desnudo, se registraron los géneros *Gloeocapsa sp.*, *Microcoleus sp.*, *Lyngbya sp.* y *Oscillatoria sp.*, destacando en esta comunidad vegetal una elevada abundancia relativa de *Oscillatoria sp.* y *Microcoleus sp.* (tabla 1). Finalmente, en las bandas de vegetación dominadas por *Lygeum spartum* y *Limonium caesium* se identificaron los géneros *Gloeocapsa sp.*, *Microcoleus sp.*, *Oscillatoria sp.*, *Phormidium sp.* y *Pseudanabaena sp.* (tabla 1). Ambas comunidades mostraron una alta abundancia relativa de *Gloeocapsa sp.* y *Oscillatoria sp.* (c. 60 %).

Tabla 1. Presencia/ausencia de cianobacterias en muestras de suelo del saladar de Cordovilla a inicios de septiembre. Los números hacen referencia a las parcelas y el color gris indica presencia.

	Salicornia fruticosa			Arthrocaulon macrostachyum			Limonium cossonianum			Lygeum spartum			Limonium caesium			Suelo desnudo		
<i>Gloeocapsa sp.</i>																		
<i>Lyngbya sp.</i>																		
<i>Microcoleus sp.</i>																		
<i>Oscillatoria sp.</i>																		
<i>Phormidium sp.</i>																		
<i>Pseudanabaena sp.</i>																		

El análisis de conglomerados mostró que las muestras estudiadas se dividían claramente en tres grupos explicativos (*i. e.*, zonas de alta, media y baja salinidad), mientras que el análisis de componentes principales (PCA) reveló que este modelo explicaba el 65,4 % de la varianza total (figura 2). El primer eje del PCA explicó el 38,6 % de la varianza, mientras que el segundo eje explicó el 26,8 % (figura 2). Las muestras en las que se encontró presencia de *Lyngbya sp.* estuvieron relacionadas principalmente con el grupo de parcelas de alta salinidad (*i. e.*, parcelas incluidas en las comunidades de especies suculentas de *S. fruticosa* y *A. macrostachyum*) (figura 2). Por otro lado, el resto de cianobacterias estudiadas (*i. e.*, *Gloeocapsa sp.*, *Microcoleus sp.*, *Oscillatoria sp.*, *Phormidium sp.* y *Pseudanabaena sp.*) estuvieron relacionadas con parcelas de baja salinidad, aparecieron dispersas entre comunidades de excretoras de sal (*i.e.*, *L. caesium*) y especies con selección selectiva de sales (*i. e.*, *L. spartum*) (figura 2). Cabe destacar que los resultados del PERMANOVA mostraron diferencias significativas en la composición

de comunidades de cianobacterias en las distintas comunidades vegetales a lo largo del gradiente de salinidad ($P \leq 0,001$).

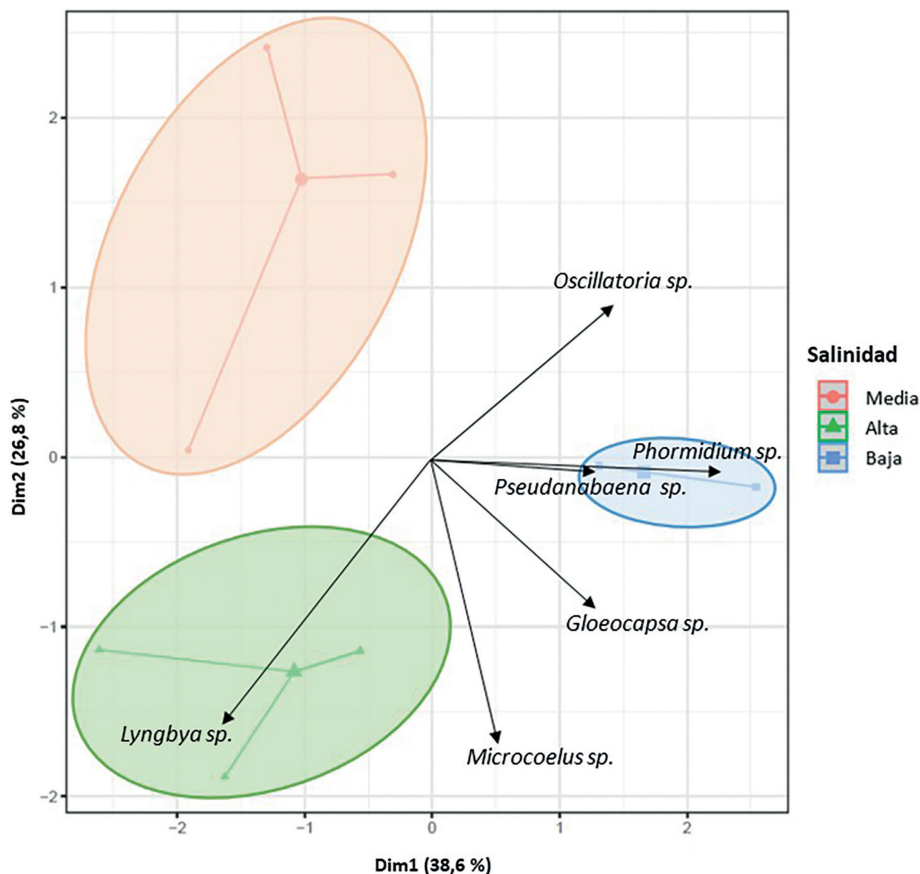


Figura 2. Diagrama combinado que muestra los resultados del análisis de conglomerados y del análisis de componentes principales. El eje 1 explica el 38,6 % de la variabilidad, mientras que el eje 2 explica el 26,8 % de la variabilidad.

En general, el género *Oscillatoria* sp. fue el más representativo en el saladar de Cordovilla (25,42 %), seguido por *Gloeocapsa* sp. y *Microcoleus* sp. (ambos con un 23,73 % de representación total) (figura 3A). En comparación, *Lyngbya* sp. y *Phormidium* sp. representaron un 11,86 % del total de riqueza específica de las cianobacterias encontradas en las muestras estudiadas. Finalmente, el género *Pseudanabaena* sp. fue el menos representado en la zona de estudio (3,39 %) (figura 3A). Asimismo, la curva de rarefacción mostró un aumento del número de especies en muestras estudiadas a lo largo del gradiente de salinidad (figura 3B). Las muestras localizadas en parcelas de alta salinidad (*i. e.*, comunidades de *S. fruticosa* y *A. macrostachyum*) mostraron una riqueza de especies menor (figura 3B), mientras que

el resto de parcelas estudiadas mostraron, en general, un mayor número de especies (*i. e.*, comunidades de *L. cossonianum* y *L. caesium*, *L. spartum* y suelo desnudo) (figura 3B).

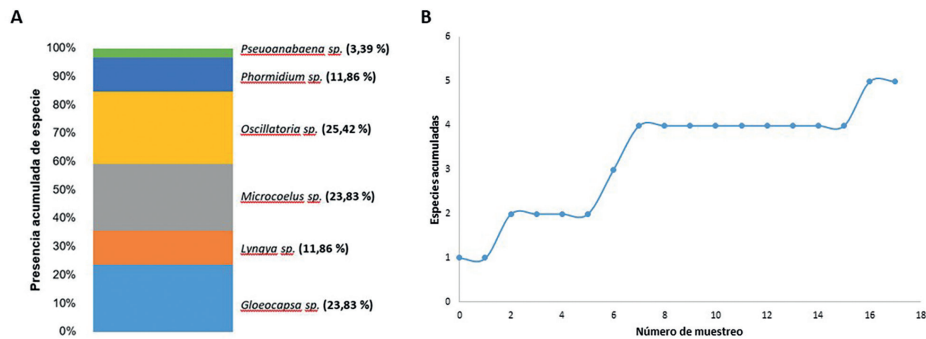


Figura 3. (A) Presencia acumulada de especies de cianobacterias en las biocostras del saladar de Cordovilla y **(B)** su curva de rarefacción, explicando el eje x las muestras estudiadas a lo largo del gradiente de salinidad (*i. e.*, muestras del 1 al 18 ordenadas en orden decreciente de salinidad).

Finalmente, cabe destacar que, en cuanto a los líquenes encontrados en la zona de estudio, se observó un predominio de *Buellia subdisciformis* (Leight.) Vain., *Caloplaca irrucescens* (Arnold) Zahlbr. y *Diploschistes actinostomus* (Ach.) Zahlbr. sobre superficies rocosas sueltas en las comunidades de *L. spartum* y *L. caesium*, no estando integrados con las comunidades de cianobacterias anteriormente señaladas. Además, no se encontraron musgos en las biocostras estudiadas.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las biocostras estudiadas en el saladar de Cordovilla estuvieron formadas principalmente por cianobacterias que colonizan la capa superficial del suelo. Los géneros más frecuentes en las distintas bandas de vegetación fueron *Microcoleus sp.* y *Oscillatoria sp.*, seguidos por *Gloeocapsa sp.* (c. 60-70 %). Además, se observó que una mayor variedad y abundancia de cianobacterias aparecieron en las bandas de vegetación de especies no suculentas (*L. cossonianum* y *L. spartum*), las zonas menos salinas del gradiente. Respecto a las especies más abundantes descritas, se observó cómo los géneros de *Oscillatoria sp.* y *Gloeocapsa sp.* se distribuyeron en las franjas no suculentas; mientras que el género *Microcoleus sp.* se distribuyó a lo largo de todo el gradiente salino, pero tuvo una preferencia por zonas con baja salinidad. Cabe destacar que la abundancia de las diferentes cianobacterias observadas fue escasa en las biocostras recolectada durante los meses de

abril-julio, predominando a partir de septiembre en el saladar a lo largo del gradiente salino. Esta baja abundancia de cianobacterias entre abril y julio podría deberse principalmente a condiciones ambientales desfavorables —como altas temperaturas, baja humedad y radiación intensa—, mientras que el aumento observado a partir de septiembre reflejaría una reactivación biológica favorecida por un clima más suave y húmedo.

A lo largo del gradiente de salinidad del saladar de Cordovilla, se ha observado una distribución diferenciada de diversos géneros de cianobacterias asociadas a las biocostras del suelo, aumentando su presencia en zonas menos salinas. El género *Gloeocapsa sp.*, típicamente presente en hábitats de agua dulce y sobre rocas húmedas (Baker, 2017), mostró una notable abundancia en las zonas menos salinas del saladar, asociadas principalmente a comunidades vegetales de *L. cossonianum*, *L. caesium* y *L. spartum*, así como a parcelas de suelo desnudo. Estos resultados apoyan lo sugerido por Baker (2017), mostrando una capacidad de tolerancia moderada a la salinidad por parte de este género. En contraste, *Lyngbya sp.* se detectó con mayor frecuencia en las zonas más salinas del gradiente, en particular en comunidades dominadas por *S. fruticosa*, *A. macrostachyum* y *L. cossonianum*, aunque con una abundancia menor. Este género presenta una distribución ecológica más amplia, siendo resistente a la salinidad y apareciendo comúnmente en ambientes de agua dulce, salobre y marina (Belnap y Lange, 2003; Guiry, 2023). Otro género ampliamente representado en las biocostras del estudio fue *Microcoleus sp.*, identificado en todas las comunidades vegetales a lo largo del gradiente de salinidad, aunque con mayor predominio en aquellas dominadas por especies no suculentas. Esta distribución sugiere que *Microcoleus sp.* es capaz de colonizar un amplio rango de condiciones salinas, si bien muestra preferencia por zonas de menor salinidad. Esta tendencia coincide con lo señalado en la literatura, donde se describe a este género como característico de ambientes áridos y semiáridos con salinidad continental (Metting, 1991; García-Pichel *et al.*, 2013; Belnap y Lange, 2003; Guiry, 2023). Además, Jørgensen *et al.* (1986) indicó que algunas especies de *Microcoleus sp.* pueden llegar a colonizar lagos hipersalinos. Además, otro de los géneros identificados ha sido *Oscillatoria sp.*, el cual, según Baker (2017) cuenta con una amplia distribución en distintos ambientes (*i. e.*, desde agua dulce a marina). En el saladar de Cordovilla, su presencia fue constante a lo largo del gradiente de salinidad, aunque más abundante en las zonas menos salinas, al igual que *Microcoleus sp.* Finalmente, el género *Phormidium sp.* se identificó en las comunidades de *L. spartum*, *L. caesium* y en parcelas de suelo desnudo, mostrando una baja tolerancia a la salinidad respecto al resto de géneros incluidos en el presente estudio. Ello podría deberse a que, según la literatura, *Phormidium sp.* habita principalmente en agua dulce, pese a que algunas especies extremófilas de este género pueden encontrarse en litoral marino, manantiales

termales o suelos desérticos (Guiry, 2023). Asimismo, en las comunidades vegetales de *L. spartum* y *L. caesium* se observó *Pseudanabaena sp.* con muy poca abundancia. Este género se caracteriza por presentar algunas especies extremófilas de lugares cálidos o hipersalinos e incluso tolerantes a ambientes hipersalinos (Baker, 2017; Molinari-Novoa, 2024). Es importante señalar que nuestros resultados la sitúan en las bandas menos salinas del saladar, por lo que la especie presente en el saladar de Cordovilla no sería extremófila.

En conclusión, en las biocostras de los suelos salinos del saladar de Cordovilla se observa un claro predominio del grupo de las cianobacterias, en contraste con la mayor abundancia de líquenes que caracteriza a las biocostras típicas de las estepas yesosas ibéricas. Este patrón puede estar relacionado con la propia naturaleza del ecosistema, ya que se trata de un criptohumedal, como ocurre en la mayoría de los saladares continentales, donde la presencia persistente de humedad edáfica y altos niveles de salinidad favorecen el desarrollo de comunidades microbianas adaptadas a estas condiciones, como las cianobacterias. En este sentido, resulta relevante considerar esta diferencia en la composición de las biocostras entre saladares y estepas yesosas, ya que puede tener implicaciones funcionales significativas. Es más, estas comunidades dominadas por cianobacterias no se distribuyen al azar, sino que presentan patrones espaciales fuertemente condicionados por el gradiente salino del suelo, el cual genera una zonación tanto en la vegetación vascular como en las biocostras. Esta estrecha relación con la salinidad sugiere que las biocostras actúan como indicadores sensibles del microambiente edáfico y pueden reflejar cambios sutiles en la composición del suelo a escalas muy finas. Finalmente, destacar que estas biocostras muestran una alta sensibilidad a las condiciones climáticas, en particular a la disponibilidad de agua y a las temperaturas extremas, factores que influyen directamente en su actividad metabólica y dinámica de crecimiento. En este contexto, el cambio climático podría tener un impacto significativo sobre su composición y funcionamiento, con repercusiones potenciales sobre el ciclo de nutrientes, la estabilidad del suelo y la productividad del ecosistema. Este riesgo subraya la necesidad de estudiar y monitorear estas comunidades como parte integral del funcionamiento ecológico de los saladares.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto de Estudios Albacetenses “Don Juan Manuel” de la Excma. Diputación Provincial de Albacete la financiación de esta investigación mediante la concesión de una ayuda a la investigación 2023. También agradecemos la ayuda en las campañas de campo a las compañeras del área de Botánica: A. D. Asencio, E. Berrendero, G. Díaz y P. Torres.

BIBLIOGRAFÍA

- Baker, A. (2017). Phycokey: una clave basada en imágenes para algas (PS Protista), cianobacterias y otros objetos acuáticos. Centro de Biología de Agua Dulce de La Universidad de New Hampshire. Disponible en: <http://cfb.unh.edu/phycokey/phycokey.htm> (12/06/2024).
- Belnap, J. (2006). Las funciones potenciales de las costras biológicas del suelo en los ciclos hidrológicos de las tierras secas. *Procesos hidrológicos: una revista internacional*, 20 (15): 3159-3178.
- Belnap, J. y Gardner, J. S. (1993). Soil microstructure in soils of the Colorado Plateau: the role of the cyanobacterium *Microcoleus vaginatus*. *Great Basin Naturalist*, 53: 40–47.
- Belnap, J. y Lange, O. L. (2003). *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Bowker, M. A. (2007). Biological soil crust rehabilitation in theory and practice: an underexploited opportunity. *Restoration Ecology*, 15 (1): 13-23.
- Bowker, M. A., Maestre, F. T. y Escolar, C. (2010). Biological crusts as a model system for examining the biodiversity-ecosystem function relationship in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 405-417.
- Bowker, M. A., Reed, S. C., Maestre, F. T. y Eldridge, D. J. (2018). Biocrusts: the living skin of the earth. *Plant and Soil*, 429: 1-7.
- Campbell, J. H., Clark, J. S. y Zak, J. C. (2009). PCR-DGGE comparison of bacterial community structure in fresh and archived soils sampled along a Chihuahuan Desert elevational gradient. *Microbial Ecology*, 57: 261e266.
- Cano-Díaz, C., Mateo, P., Muñoz Martín, M. A. y Maestre, F. T. (2018). Diversity of biocrust forming cyanobacteria in a semiarid gypsiferous site from Central Spain. *Journal of Arid Environments*, 15: 83-89.
- Cirujano, S. (1990). *Flora y vegetación de las lagunas húmedas de la provincia de Albacete*. Instituto de Estudios Albacetenses “Don Juan Manuel”. Albacete. 144 pp.
- Darrouzet-Nardi, A., Reed, S. C., Grote, E. E. y Belnap, J. (2015). Observations of net soil exchange of CO₂ in a dryland show experimental warming increases carbon losses in biocrust soils. *Biogeochemistry*, 126: 363-378.
- Dirección General de Política Forestal y Espacios Naturales. (2015). *Plan de gestión de Saladares de Cordovilla y Agramón y laguna de Alboraj, ES4210011 (Albacete)*. Consejería de Agricultura, Medio Ambiente y Desarrollo Rural. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.
- Ferrenberg, S., Reed, S. C., Belnap, J. y Schlesinger, W. H. (2015). Climate change and physical disturbance cause similar community shifts in biological soil crusts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112: 12116-12121.
- García-Pichel, F., Loza, V., Marusenko, Y., Mateo, P. y Potrafka, R. M. (2013). Temperature drives the continental-scale distribution of key microbes in topsoil communities. *Science*, 340 (6140): 1574-1577.

- Gold, W. G. y Bliss, L. C. (1995). Water limitations and plant community development in a polar desert. *Ecology*, 76: 1558–1568.
- Guiry, M. D. (2023). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Disponible en: <https://www.algaebase.org> (12/06/2024).
- John, D., Brooks, A.J., y Whitton, B. (2011). *The Freshwater Algal Flora of the British Isles. An Identification Guide to Freshwater and Terrestrial Algae*. Cambridge University Press, 896 pp.
- Jørgensen, B. B., Cohen, Y. y Revsbech, N. P. (1986). Transition from anoxygenic to oxygenic photosynthesis in a *Microcoleus chthonoplastes* cyanobacterial mat. *Applied and Environmental Microbiology*, 51 (2), 408–417.
- Komárek, J. (2013). *Süßwasserflora von Mitteleuropa, Bd. 19/3: Cyanoprokaryota. Süßwasserflora von Mitteleuropa, (1ª ed.)*. Heidelberg: Springer Spektrum.
- Komárek, J. y Anagnostidis, K. (1998). *Cyanoprokaryota 1. Chroococcales*. En: H. Ettl, G. Gärtner, H. Heynig, y D. Mollenhauer (Eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa 19/1* (p. 548). Jena-Stuttgart-Lübeck-Ulm: Gustav Fischer.
- Komárek, J. y Anagnostidis, K. (2005). *Cyanoprokaryota. 2. Oscillatoriales*. En: B. Büdel, L. Krienitz, G. Gärtner, & M. Schagerl (Eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa 19/2* (p. 759). Heidelberg: Elsevier/ Spektrum.
- Maestre, F. T., Escolar, C., de Guevara, M. L., Quero, J. L., Lázaro, R., Delgado-Baquerizo, M., Ochoa, V., Berdugo, M., Gozalo, B. y Gallardo, A. (2013). Changes in biocrust cover drive carbon cycle responses to climate change in drylands. *Global Change Biology*, 19 (12): 3835–3847.
- Maestre, F. T., Martín, N., Beatriz Díez, B., López-Poma, R., Santos, F., Luque, I. y Cortina, J. (2006). Watering, fertilization, and slurry inoculation promote recovery of biological crust function in degraded soils. *Microbial Ecology*, 52: 365–377.
- Martínez Catena, M. P. (2020). *Distribución y grado de protección de las costras biológicas del suelo en el territorio peninsular español*. Trabajo fin de grado. Universidad de Almería.
- Metting, B. (1991). Biological surface features of semiarid lands and deserts. En J. Skujins (ed.) *Semiarid lands and deserts: soil resource and reclamation*, Marcel Dekker, New York. pp. 257–293.
- Molinari-Novoa, E. A. (2024). AlgaeBase. Publicación electrónica mundial, Universidad Nacional de Irlanda, Galway. Disponible en: <https://www.algaebase.org>. (12/06/2024).
- Moreno, J., Terrones, A., Juan, A. y Alonso, M. A. (2018). Halophytic plant community patterns in Mediterranean saltmarshes: shedding light on the connection between abiotic factors and the distribution of halophytes. *Plant and Soil*, 430 (1-2), 185–204.
- Oksanen, J. (2001). *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.7-1. Disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan>.

- R Development Core Team (2024) R: A language and environment for statistical computing—R Found. Stat. Comp., Vienna, Austria. Disponible en: <http://www.R-project.org/>
- Reed, S. C., Coe, K. K., Sparks, J. P., Housman, D. C., Zelikova, T. y Belnap, J. (2012). Changes to dryland rainfall result in rapid moss mortality and altered soil fertility. *Nature Climate Change*, 2: 752–755.
- Rivas-Martínez, S. (2007). Mapa de series, geoseries y geopermaseries de vegetación de España. Memoria del mapa de vegetación potencial de España, Parte I. *Itinera Geobotanica*, 17: 5-436.
- Rodríguez-Caballero, E., Castro, A. J., Chamizo, S., Quintas-Soriano, C., García-Llorente, M., Cantón, Y. y Weber, B. (2018). Ecosystem services provided by biocrusts: From ecosystem functions to social values. *Journal of Arid Environments*, 159: 45-53.
- Terrones, A., Moreno, J., y Alonso, M. A. (2016). El género *Limonium* en el LIC “Saladares de Cordovilla y Agramón y laguna de Alboraj”. En Blanco, D., Fajardo, J., Ferrandis, P., Gómez, J., Picazo, J., Sanz, D., Valdés, A. y Verde, A. (Coords.). *III Jornadas sobre el medio natural albacetense*, pp. 77-89. Instituto de Estudios Albacetenses Don Juan Manuel. Albacete.
- Valdés, A., González, J. L. y Molina, R. (1993). *Flora y Vegetación de los saladares de Cordovilla y Agramón (SE de Albacete)*. Instituto de Estudios Albacetenses de la Excma. Diputación de Albacete. Serie I-Estudios-Núm. 73. 158 pp.
- 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., Rodríguez-Caballero, E., Tucker, C., Young, K. E., Zhang, Y., Zhao, Y., Zhou, X. y Bowker, M. A. (2022). What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening research community. *Biological Reviews*, 97 (5): 1768-1785.
- Wirth, V. (2004). *Guía de campo de los líquenes, musgos y hepáticas: con 288 especies de líquenes y 226 de briófitos (musgos y hepáticas)*. Omega, Barcelona. 590 pp.