



La biodiversidad y el carbono orgánico del suelo son esenciales para revertir la desertificación

Miriam Muñoz-Rojas^{1,2,*} , Manuel Delgado-Baquerizo^{3,4} , Manuel E. Lucas-Borja⁵ 

(1) Centre for Ecosystem Science, School of Biological, Earth and Environmental Sciences, UNSW Sydney, Sydney, NSW, Australia

(2) Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Sevilla, Sevilla, España

(3) Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS), CSIC, Av. Reina Mercedes 10, E-41012, Sevilla, España

(4) Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide, 41013 Sevilla, España

(5) Escuela Técnica Superior Ingenieros Agrónomos y Montes, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, España

* Autor de correspondencia: Miriam Muñoz-Rojas [m.munoz-rojas@unsw.edu.au]

> Recibido el 07 de mayo de 2021 - Aceptado el 30 de agosto de 2021

Como citar: Muñoz-Rojas, M., Delgado-Baquerizo, M., Lucas-Borja, M.E. 2021. La biodiversidad y el carbono orgánico del suelo son esenciales para revertir la desertificación. *Ecosistemas* 30(3): 2238. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2238>

La biodiversidad y el carbono orgánico del suelo son esenciales para revertir la desertificación

Resumen: La biodiversidad y el carbono orgánico del suelo, así como la interacción entre ambos, juegan papeles esenciales en el mantenimiento y regulación de los servicios ecosistémicos de las zonas secas, desde la fertilidad del suelo a la producción de alimentos. El cambio climático y los impactos antrópicos pueden provocar pérdidas en la biodiversidad y carbono del suelo, lo cual puede resultar en alteraciones de los ciclos del carbono y la funcionalidad de los ecosistemas derivando en procesos acelerados de desertificación. Es necesario, por tanto, mejorar nuestro conocimiento sobre la compleja diversidad biológica del suelo, así como su interacción con el carbono orgánico en las zonas secas. Esto nos permitirá diseñar estrategias efectivas para promover el secuestro de carbono en el suelo, contribuyendo así a revertir los procesos de degradación y desertificación. En esta revisión discutimos la importancia de la biodiversidad y el carbono orgánico del suelo de las zonas secas en un contexto de cambio global, definiendo la relación entre ambos y su respuesta a factores climáticos y degradación. También destacamos el uso de herramientas avanzadas tales como la genómica, y prácticas relevantes de manejo del suelo que nos permitan incrementar los contenidos de carbono y mejorar la diversidad y funcionalidad de suelo en las zonas secas, con el fin último de prevenir y revertir la desertificación.

Palabras clave: cambio climático; carbono del suelo; desertificación; enmiendas orgánicas; inóculos microbianos; microorganismos del suelo

Soil biodiversity and organic carbon are essential to reverse desertification

Abstract: Soil biodiversity, organic carbon, and their interactions, play critical roles for the maintenance and regulation of ecosystem services in drylands, including soil fertility and food production, among others. Climate change and anthropogenic impacts can result in soil carbon and biodiversity decreases, which can cause alterations of the carbon cycle and the loss of essential ecosystem functions. It is therefore crucial to advance our knowledge on the complex soil biological diversity, and its interactions with the soil organic carbon in drylands. This information will allow us to design effective strategies for carbon sequestration, thus contributing to reverse desertification. In this review, we discuss the importance of the soil biodiversity and organic carbon in drylands in a global change context and underline their interactions and their responses to climate change and degradation. We also highlight the use of novel techniques recently developed, including genomics, and effective soil management practices for promoting soil biodiversity and enhancing soil carbon levels, to ultimately, halt degradation and desertification.

Keywords: climate change; desertification; microbial inoculation; organic amendments; soil carbon; soil microbial communities

Introducción

Modelos climáticos recientes han pronosticado que el cambio climático provocará un aumento de hasta un 23% del área ocupada por las zonas secas para 2100 (Huang et al. 2016). Se prevé, por tanto, que estas zonas (hiperáridas, áridas, semiáridas y secas subhúmedas) lleguen a ocupar el 56% de la superficie terrestre (Huang et al. 2017). El cambio en el clima es uno de los factores con mayor influencia en los suelos de las zonas secas, principalmente a través de la reducción de procesos fundamentales tales como la producción primaria, la entrada y descomposición de hojarasca al sistema y los procesos erosivos asociados a lluvias torrenciales (FAO

2016). Pero además de los impactos climáticos, las zonas secas están sufriendo niveles sin precedentes de degradación del suelo asociados con procesos antrópicos tales como la deforestación, la excesiva recurrencia e intensidad de incendios forestales, el sobrepastoreo, y otras actividades intensivas tales como la agricultura y la minería (Fig. 1), lo cual está promoviendo procesos globales de desertificación (Bateman y Muñoz-Rojas 2019; Burrell et al. 2016). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la cual lidera el esfuerzo internacional para combatir la degradación y garantizar la seguridad alimentaria, ha definido la degradación de forma específica como “un cambio en la salud del suelo resultando en una disminución de la capacidad del

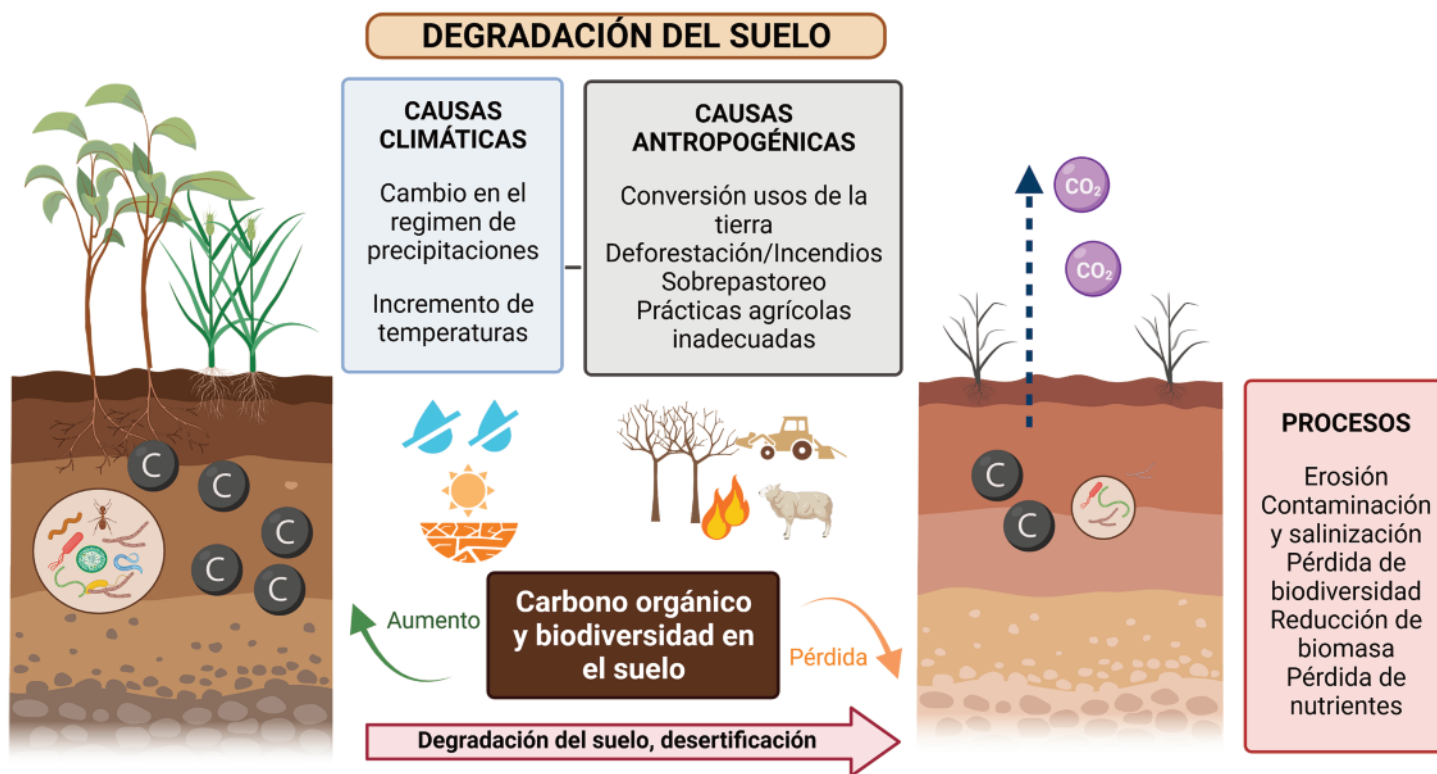


Figura 1. La degradación del suelo como consecuencia del cambio global, incluyendo factores climáticos (reducción de las precipitaciones que a su vez serán más intensas e incremento de las temperaturas), y antrópicos (conversión del uso de la tierra, incendios, y sobrepastoreo, entre otros) puede tener como resultado una reducción en el contenido de carbono y la biodiversidad del suelo. Mediante estrategias de restauración se puede incrementar el contenido de materia orgánica y la biodiversidad del suelo, y con ello, aumentar su fertilidad y mejorar su funcionalidad. Figura creada con BioRender.com.

Figure 1. Soil degradation, caused by global change impacts including climatic (reduced and more intense precipitation and increased temperature), and anthropogenic factors (land use change, intense fire and overgrazing, among others) can accelerate processes like erosion, contamination, and loss of biomass, nutrients and biodiversity. Restoration strategies that improve soil organic carbon and biodiversity can promote soil fertility and functionality. Created with BioRender.com.

ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios” (FAO 2016). A su vez, la desertificación se ha definido por Naciones Unidas como “la degradación de los suelos de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultantes de diversos factores, entre ellos las variaciones climáticas y las actividades humanas” (UNCCD 1994). En conjunto, las condiciones ambientales áridas y la presión provocada por actividades antrópicas sobre la cobertura y diversidad de la vegetación han contribuido a una disminución importante del potencial productivo de los suelos y de su capacidad para mantener la funcionalidad de los ecosistemas terrestres (Bach et al. 2020; Gaitán et al. 2018). Por todo ello, es esencial que en el futuro estudiemos con mayor detalle la importancia entre las interacciones de clima y actividades humanas como causantes de procesos de degradación de suelo (Fig. 2).

La degradación del suelo y, en particular, la pérdida de la fracción orgánica, y de la biodiversidad de este, son algunos de los problemas ambientales de mayor gravedad de este siglo que, junto con los efectos del cambio climático, plantea serios riesgos para la sostenibilidad de los ecosistemas terrestres y la seguridad alimentaria mundial (Plaza et al. 2018; Timmis y Ramos 2021). Tanto la biodiversidad como el carbono orgánico del suelo, los cuales están íntimamente relacionados a través de numerosos procesos (ej. descomposición de la hojarasca y la materia orgánica), juegan papeles fundamentales en la regulación y mantenimiento de los ecosistemas. El carbono orgánico es indispensable para la regulación del clima y el mantenimiento de la estabilidad al suelo, la disponibilidad de nutrientes para plantas, la capacidad de retención de agua y la biodiversidad del suelo, ya que proporciona el principal hábitat a los organismos edáficos (Muñoz-Rojas 2018; Soong et al. 2020). A su vez, el conjunto de organismos del suelo, formado por microorganismos y meso, macro y microfauna, desempeña un papel básico en la funcionalidad de los ecosistemas terrestres (Bardgett y

van der Putten 2014; Ramos y Lansac 2020), tanto en el establecimiento de los ciclos biogeoquímicos como en la formación de la estructura de los suelos y el mantenimiento de su fertilidad (Delgado-Baquerizo et al. 2020; Neilson et al. 2017).

Por todo esto, es fundamental avanzar nuestro conocimiento sobre cómo la biodiversidad y el carbono orgánico mantienen la producción de alimentos, el almacenamiento de agua, y la mitigación del cambio climático (Laban et al. 2018; Pereira et al. 2018). Un mayor entendimiento de estos procesos podría ayudar a diseñar herramientas apropiadas para combatir la degradación de tierras y desertificación (Bünemann et al. 2018; Khalil et al. 2019). Existen diversas prácticas de manejo del suelo que pueden incrementar su contenido de carbono y biodiversidad, mejorando su fertilidad y reduciendo el uso de fertilizantes químicos y otros insumos (Hueso-González et al. 2018). Sin embargo, el efecto de estas estrategias sobre la diversidad y funcionalidad de los organismos edáficos depende de numerosos factores que aún no se conocen a fondo (Bastida et al. 2017; Irfan et al. 2019). El avance en técnicas analíticas y estadísticas y tecnologías de genómica está permitiendo entender mejor el papel de los organismos del suelo en el contexto de cambio global (Delgado-Baquerizo et al. 2018; Fierer 2017). Además, esta información puede ser crucial para el desarrollo de nuevos enfoques ecológicos y metodologías biotecnológicas que ayuden a combatir la degradación de suelos (Roman et al. 2020; Adessi et al. 2021). En esta revisión discutimos la importancia del carbono orgánico y la biodiversidad del suelo en las zonas secas, así como la relación entre ambos, y su respuesta a cambios en el clima y a procesos de degradación. Además, destacamos las estrategias más relevantes para incrementar los contenidos de carbono y mejorar la diversidad y funcionalidad de suelo en las zonas secas, y por tanto con mayor potencial para prevenir y revertir la desertificación.

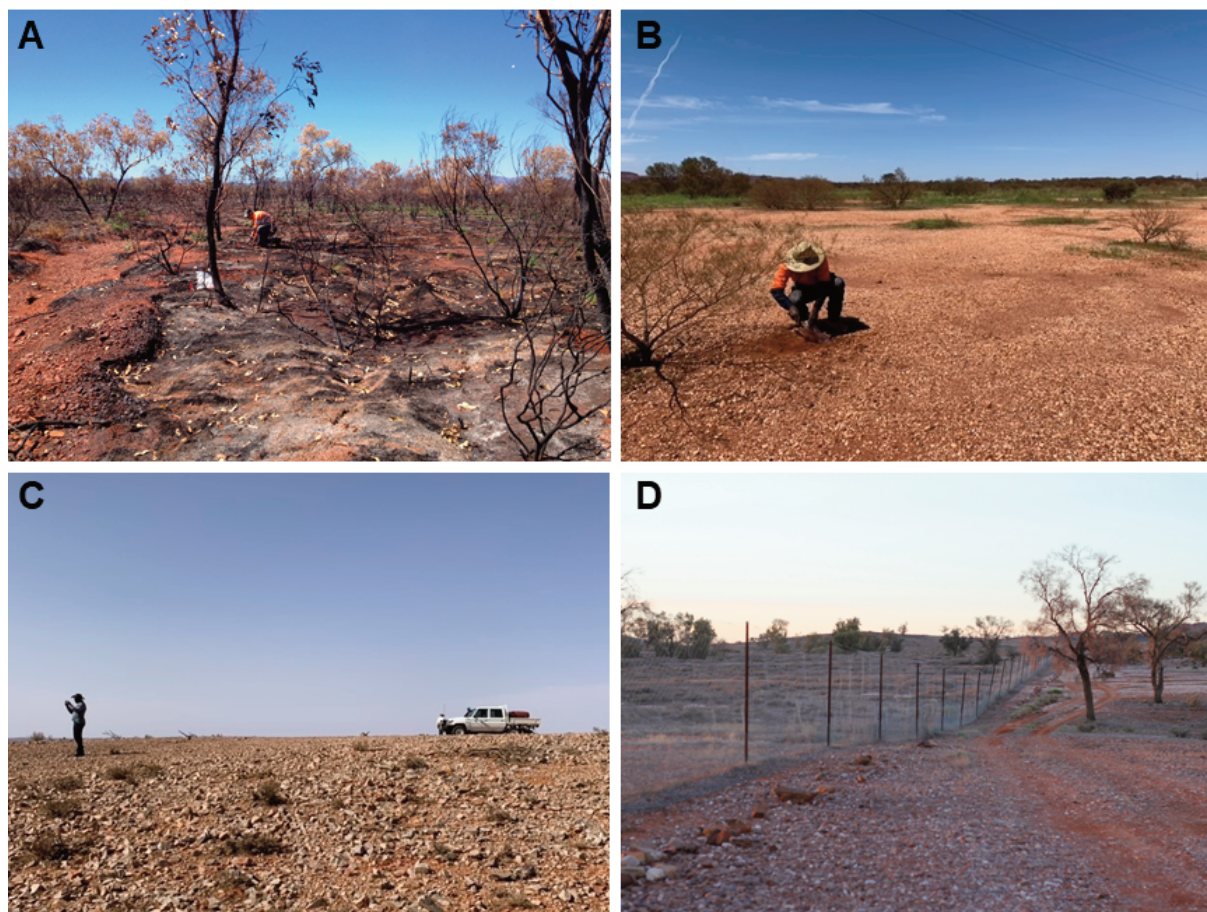


Figura 2. Ejemplos de suelos degradados en zonas áridas. **A)** Suelo afectado por incendios en el cual la pérdida de la cobertura vegetal incrementa el riesgo de erosión y **B)** suelo afectado por sobrepastoreo de ganado vacuno e infraestructuras por desarrollo industrial, ambos en la zona árida de Australia Occidental (región de la Pilbara). **C)** Suelos afectados por sobrepastoreo de ganado ovino y **D)** recinto vallado (área de conservación) para exclusión de animales, principalmente ovejas y canguros, y protección de cubierta vegetal y fertilidad del suelo, en el interior de Australia Oriental (área de Broken Hill).

Figure 2. Examples of degraded soils in drylands. **A)** Post-fire soil susceptible to erosion processes because of loss of vegetation cover and **B)** soil impacted by overgrazing (mainly cattle) and rural infrastructures for industrial development, both in the arid zone of Western Australia (Pilbara region). **C)** Soils affected by overgrazing and **D)** animal enclosure fence (conservation area) to protect these zones from the impacts of sheep and kangaroos mainly, and preserve the vegetation cover and soil fertility, in the arid zone of Eastern Australia (Broken Hill area).

Importancia y vulnerabilidad del carbono orgánico en los suelos de las zonas secas

Los suelos de las zonas secas contienen alrededor de 470 Pg de carbono orgánico en su capa superior (1m), que corresponde al 32% del total de carbono orgánico en suelos de todo el mundo (Plaza et al. 2018). Las tierras secas se caracterizan por su déficit hídrico, el cual limita la productividad y descomposición vegetal y por tanto la acumulación de carbono orgánico en los suelos, el cual decrece con la temperatura (Cowie et al. 2011; Plaza et al. 2018). A pesar de su bajo contenido, el papel de estas áreas en el balance global de carbono es fundamental, ya que, al conformar el mayor bioma de la tierra, y dada su alta sensibilidad al cambio climático, pequeñas variaciones en la temperatura y la precipitación pueden aumentar la respiración del suelo y la emisión de CO₂ (Lal 2019; Reed et al. 2012; Vicca et al. 2014). Asumiendo que el carbono perdido puede ser secuestrado a través de un adecuado manejo, los suelos de las zonas secas podrían tener un potencial considerable para almacenar carbono, y por esto se han propuesto como áreas prioritarias para fomentar su secuestro (Aguilera et al. 2013; Laban et al. 2018). Sin embargo, también se ha argumentado su limitado potencial para almacenar carbono, en particular a escalas regionales o globales (Hoyle et al. 2013; Schlesinger y Amundson 2019), debido no solo a factores climáticos y biofísicos, sino también a factores socioeconómicos, tales como la capacidad de adopción de medidas de manejo de suelos que promuevan el secuestro de car-

bono (Fu et al. 2021). Además de su importante papel en la regulación climática, el carbono orgánico es fundamental para sostener la calidad y la fertilidad del suelo, y mejorar su productividad, ya que favorece la estabilidad estructural del suelo y la capacidad de retención hídrica, lo cual también tiene una implicación directa en la biodiversidad del suelo (Yang et al. 2019). En conjunto, el carbono orgánico del suelo contribuye a los ciclos biogeoquímicos de varios nutrientes e influye en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Pereira et al. 2018). Por todo esto se ha propuesto de manera reiterada como indicador clave de la calidad del suelo en las tierras secas y para monitoreo de procesos de degradación, desertificación y restauración (FAO 2016; Muñoz-Rojas et al. 2021a).

A su vez, el carbono orgánico del suelo de zonas secas es altamente vulnerable al cambio climático y a procesos de desertificación asociados a la pérdida de vegetación por usos intensivos del suelo e incrementos de aridez (Pries et al. 2017). La pérdida de carbono en los suelos de zonas secas podría tener impactos importantes en el funcionamiento de sus ecosistemas y sobre los servicios que proporcionan y mantienen a la población humana que en ellos habita, tales como la biodiversidad (FAO 2016, 2020). Los estudios más recientes sugieren que las pérdidas de carbono asociados al cambio climático no serán graduales, sino que responderán drásticamente cuando se sobrepasen determinados umbrales de aridez (Lian et al. 2021). De este modo, pequeños incrementos de aridez asociados al cambio climático derivarán en cambios sig-

nificativos en el contenido de carbono en los suelos de las zonas secas, con implicaciones globales aún desconocidas (Pries et al. 2017). Por todo esto, es necesario cuantificar de manera precisa la capacidad del suelo para retener carbono a escalas regionales y globales y mejorar las predicciones a escala global de su persistencia y vulnerabilidad (Lehmann et al. 2020). Esto implica un conocimiento preciso de la variabilidad espacial (horizontal y vertical), y temporal, de la humedad, temperatura y contenido de nutrientes en los suelos, que puedan afectar a las tasas de descomposición de materia orgánica (Crowther et al. 2019; Eglinton et al. 2021).

Los factores que determinan los contenidos de carbono orgánico del suelo en las zonas secas cambian con la profundidad. En las capas superiores, factores climáticos determinan la capacidad de retención hídrico, y el uso específico del suelo, condiciona la cantidad y contenido de carbono orgánico (Muñoz-Rojas et al. 2015; Willaarts et al. 2016). En el subsuelo, en cambio, la textura puede tener una mayor influencia en la acumulación de carbono orgánico (Hobley y Wilson 2016). En general, la mayoría de los estudios de carbono orgánico en suelos en zonas áridas, se han centrado en los horizontes superficiales, pero procesos como la transferencia vertical de las fracciones más lábiles o activas de carbono a lo largo del perfil del suelo, pueden ser fundamentales para la estabilidad del carbono en el suelo a corto y largo plazo (Lavallee et al. 2020). La materia orgánica es un complejo aglomerado de distintas formas de carbono, de más lábiles a más recalcitrantes, que se almacenan en diferentes fracciones minerales y particuladas (Almendros et al. 2018). Las fracciones más lábiles, las cuales incluyen la biomasa microbiana y la materia orgánica particulada, pueden ser más sensibles al uso y manejo del suelo y, por tanto, más sensibles a la degradación (Lehmann et al. 2020). Por el contrario, la materia orgánica del suelo asociada a la fracción mineral parece ser menos sensible al cambio climático (Lugato et al. 2021). En definitiva, aún no tenemos una imagen clara sobre las formas de almacenaje, calidad y sensibilidad del carbono de zonas secas a escala global, lo cual es un importante desafío para conocer de manera precisa la capacidad de secuestro de carbono en el suelo (Lavallee et al. 2020). El uso de tecnologías de pirolisis y fraccionamiento de materia orgánica será fundamental para avanzar nuestro conocimiento en esta dirección (Jiménez-González et al. 2020).

La importancia de la biodiversidad del suelo en las zonas secas

La importancia de la biodiversidad del suelo a nivel mundial fue reconocida en el Convenio de Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica en 1992. Desde entonces, distintas instituciones han empezado a considerar la biodiversidad del suelo en sus agendas (*Global Soil Partnership* entre otras), y han surgido propuestas como la Iniciativa Global para la Biodiversidad del Suelo, que tienen por objetivo conectar el conocimiento que estamos adquiriendo sobre la biodiversidad del suelo, con acciones específicas hacia un futuro sostenible (Bach et al. 2020; FAO 2020). Numerosos estudios de laboratorio controlados, así como muestreos globales, están demostrando que la biodiversidad y la abundancia de los distintos organismos del suelo, desde seres unicelulares hasta pequeños mamíferos excavadores, son fundamentales para mantener la disponibilidad de nutrientes, la capacidad de descomponer materia orgánica y la productividad primaria de las zonas áridas (Delgado-Baquerizo et al. 2016; Trivedi et al. 2019; Ochoa-Hueso et al. 2018).

La fauna del suelo influye de manera sustancial en la dinámica de carbono orgánico mediante la alteración de sus perfiles y el movimiento de la hojarasca, lo cual puede afectar a la redistribución del carbono orgánico y la liberación de la materia orgánica particulada, afectando a su vez a la actividad microbiana (Franco et al. 2020). Organismos tales como las lombrices de tierra tienen un papel fundamental en el mantenimiento de la fertilidad del suelo en las zonas secas, ya que contribuyen a la fragmentación y descomposición de restos vegetales, favoreciendo la incorporación de materia orgánica al suelo (van den Hoogen et al. 2019).

A pesar de su reducido tamaño, los microorganismos del suelo como hongos y bacterias, contribuyen a un sinfín de procesos ecosistémicos entre los que destacan el ciclo de nutrientes, la degradación de la materia orgánica, y la productividad primaria de plantas a través de fenómenos de patogénesis y de simbiosis con las mismas (Bardgett y van der Putten 2014; Wagg et al. 2014). Las zonas secas mantienen comunidades microbianas complejas y diversas (García-Pichel et al. 2013; Maestre et al. 2015; Eldridge et al. 2017; Ferrenberg et al. 2018) que se enmarcan en la red trófica de organismos del suelo (Neilson et al. 2017; Delgado-Baquerizo et al. 2020). La aridez, junto con la cantidad de carbono orgánico de suelo y la cobertura de plantas, son precisamente los principales factores que controlan la diversidad y abundancia de los microorganismos del suelo en las zonas secas (Maestre et al. 2015). Sin embargo, otros factores reguladores, como la acidez del suelo, que son clave en otros biomas, (Fierer y Jackson 2006) son menos importantes en estos ecosistemas, donde el pH de los suelos oscila típicamente entre neutro y alcalino (Maestre et al. 2015).

A baja resolución taxonómica, las comunidades microbianas de las zonas secas podrían parecer similares a las de zonas más húmedas. En ambos casos están dominados por comunidades de bacterias y hongos como las Actinobacteria, Acidobacteria, Alphaproteobacteria, Ascomycota y Basidiomycota, (Maestre et al. 2015; Tedersoo et al. 2014). Además, las zonas secas también incluyen importantes grupos funcionales de hongos, desde descomponedores a patógenos de plantas y hongos micorrízicos. Estas comunidades de hongos juegan un papel esencial en la acumulación de carbono en el suelo, ya que participan de manera activa en la descomposición de materia orgánica (Verbruggen et al. 2018). Los hongos que establecen micorrizas arbusculares, forman simbiosis con la mayoría de las plantas de suelos áridos, proporcionando una mejor absorción de nutrientes y una mayor captación de agua a las mismas. Estos hongos pueden contribuir considerablemente al secuestro de carbono ya que también mejoran las características físicoquímicas del suelo, favoreciendo la formación de agregados y enriquecimiento de la materia orgánica (Remke et al. 2021). De forma similar, los hongos ectomicorrízicos juegan un papel fundamental para las plantas nativas de las zonas secas, ya que protegen a las mismas de patógenos, lo que a la vez repercute en una mejora de la diversidad de los organismos del suelo (Tedersoo et al. 2020).

A una mayor resolución taxonómica, las zonas secas mantienen comunidades microbianas únicas y poco estudiadas (Vasar et al. 2021). Por ejemplo, un estudio reciente sugiere que la mayoría de las especies de hongos desconocidas a escala global se encuentran en zonas secas (Delgado-Baquerizo 2019). Algunas especies comunes en estas zonas son las bacterias *Geodermatophilus obscurus*, *Streptomyces mirabilis*, *Modestobacter sp.*, *Skermanella sp.* y *Sphingomonas sp.* (Mohammadipanah y Wink 2016; Delgado-Baquerizo et al. 2018; Egidi et al. 2019), los hongos patógenos *Alternaria sp.* y *Fusarium sp.*, y especies de hongos que forman parte de las costras biológicas del suelo como *Cladosporium sp.* y *Chaetomium sp.* Las cianobacterias, especialmente de la clase fotosintética Cyanobacteria (antes Oxyphotoproteobacteria), y algas verdes (Chlorophyta), también forman parte importante de los microorganismos del suelo de las zonas secas, donde aprovechan la baja cobertura de plantas propia de estos ecosistemas. Estos organismos viven en los primeros milímetros del suelo y ayudan a la fijación de carbono y nitrógeno, y a estabilizar el suelo, además de ser un componente fundamental de las costras biológicas (García-Pichel et al. 2013; Ferrenberg et al. 2018; Cano-Díaz et al. 2020). Las algas verdes, y otros linajes fotosintéticos, pueden llegar a constituir hasta el 40% de los protistas en estos ecosistemas (Oliverio et al. 2020).

A pesar de que muchos de los organismos del suelo poseen adaptaciones para resistir el estrés asociado a la intensa radiación solar y desecación de las zonas secas, también sabemos que son altamente vulnerables al cambio climático, especialmente al incremento de aridez (Delgado-Baquerizo et al. 2017; Reed et al. 2012)

el cual ha provocado cambios drásticos en comunidades microbianas del suelo de todo el mundo (Berdugo et al. 2020). Se espera, además, que la proporción de patógenos en el suelo de zonas áridas incremente en respuesta al calentamiento global (Delgado-Baquerizo et al. 2020). A su vez, se ha demostrado que las actividades antropogénicas que promueven cambios en el suelo hacia usos más intensivos pueden generar impactos importantes en la biodiversidad del suelo mediante procesos de compactación, erosión del suelo, o destrucción de los ciclos biológicos por uso de productos químicos (Bach et al. 2020). Todo esto puede alterar de manera significativa la frágil red de interacciones entre las plagas y sus enemigos naturales, promoviendo una disminución de comunidades nativas de organismos del suelo en favor de otras especies invasivas (Li et al. 2018).

En general, pérdidas de la biodiversidad del suelo a causa del cambio climático y la degradación de suelos por actividades antropogénicas, podrían resultar en una menor capacidad de las zonas secas para mantener su funcionamiento ecosistémico (Neilson et al. 2017; Delgado-Baquerizo et al. 2020). Es necesario, por tanto, desarrollar nuevos estudios que analicen la inmensidad del microbioma ambiental, e identifiquen las aún desconocidas –que son la mayoría– y su funcionalidad en zonas secas a escala global, para proporcionar un conocimiento más completo que nos ayude a identificar como proteger estas áreas de la degradación y desertificación en un contexto de cambio global.

Estrategias actuales de restauración y conservación para promover el secuestro de carbono y la biodiversidad del suelo en las zonas secas

Se ha demostrado que la biodiversidad del suelo puede mantenerse e incluso recuperarse tras su degradación, mediante la mejora en el uso y manejo del suelo a través de restauración del territorio o pastoreo y agricultura de conservación (laboreo reducido, siembra directa en cultivos herbáceos y cubiertas vegetales en cultivos leñosos, entre otras prácticas). Estas prácticas pueden incrementar la cobertura y diversidad vegetal, lo cual promueve la acumulación de carbono en suelo y a su vez incremental la abundancia y diversidad de distintos organismos en el suelo (Burrell et al. 2016; Bateman et al. 2019; Khalil et al. 2019) (Fig. 3).

Dentro de estas prácticas, destaca el aporte directo de materia orgánica al suelo, generalmente denominado enmienda orgánica, que puede no solo incrementar el contenido de carbono orgánico en el suelo, sino favorecer la disponibilidad de otros nutrientes y, en conjunto, mejorar la biodiversidad del suelo y su fertilidad (Bach et al. 2020; Irfan et al. 2019). Las enmiendas orgánicas pueden incluir cualquier material orgánico, tales como abono, estiércol animal, residuos de cultivos o acondicionadores de suelo sintéticos, que se incorporan al suelo o se aplican en superficie para promover el crecimiento vegetal (Jordán et al. 2011; Meena et al. 2020) evitando la aplicación de fertilizantes químicos y pes-

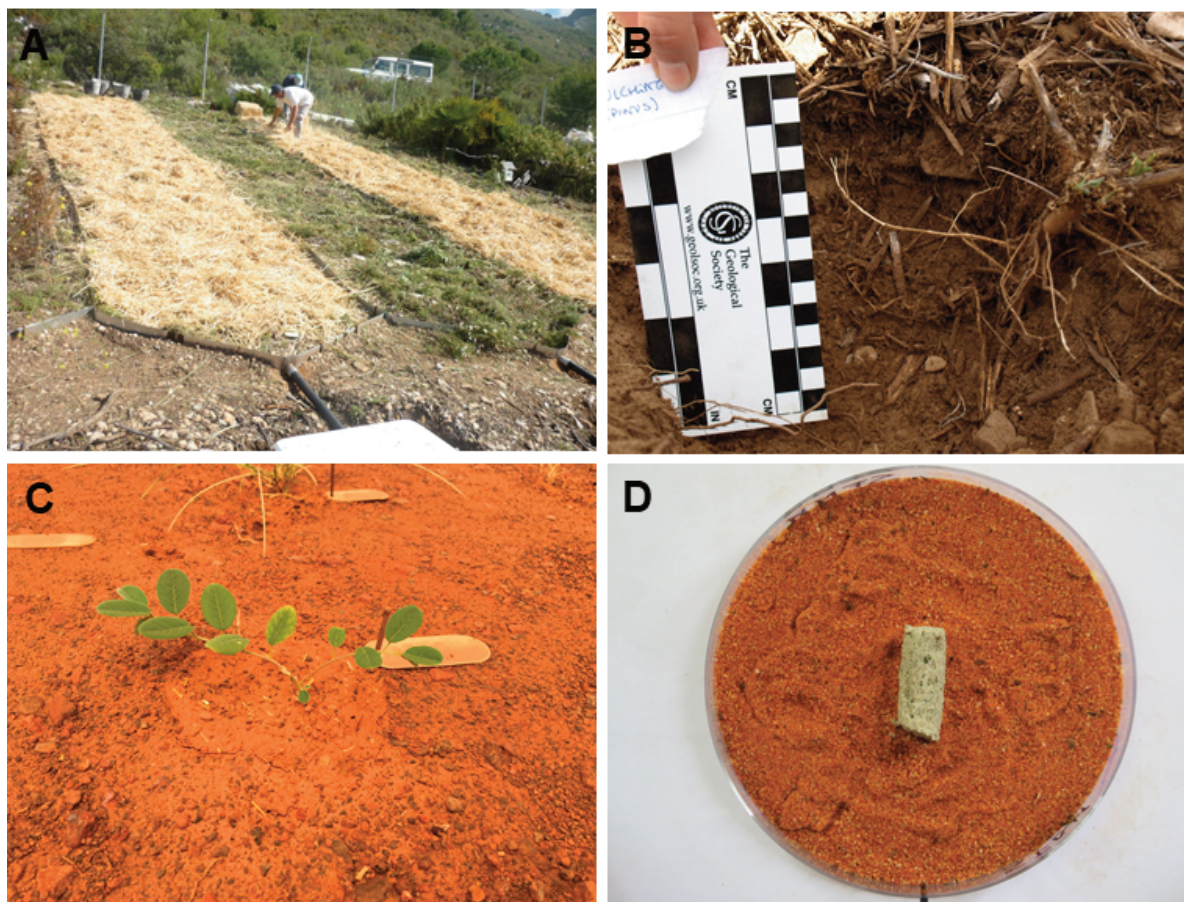


Figura 3. Ejemplos de técnicas de restauración de suelos. **A)** Enmiendas orgánicas en forma de cubierta vegetal ‘mulch’, y **B)** perfil de suelo del suelo tratado con la cubierta, en una zona semiárida Mediterránea (Málaga, Andalucía) (Hueso-Gonzalez et al. 2016). **C)** Plántula de *Acacia* sp. establecida con el sistema de peletizado de semillas usando suelo de la capa superficial y material vegetal de plantas herbáceas nativas (Stock et al. 2020). **D)** Pellet formado por una mezcla de arcillas y áreas que encapsula cianobacterias nativas previamente aisladas a partir de biocostras de Australia Occidental (región de la Pilbara) (Roman et al. 2020). Estas tecnologías de mejora de suelos y semillas usando microorganismos nativos se están empezado a usar de manera habitual en programas de restauración de zonas secas.

Figure 3. Examples of soil restoration approaches. **A)** Organic amendments (mulch), and **B)** soil profile of the soil amended, in a Mediterranean semi-arid area (Malaga, Spain) (Hueso-Gonzalez et al. 2016). **C)** *Acacia* sp. seedling established using a seed-soil pellet that incorporates native plant’s mulch (Stock et al. 2020). **D)** Pellet composed of bentonite and sand encapsulating cyanobacteria isolated from native biocrust from Western Australia (Pilbara region) (Roman et al. 2020). These soil and seed enhancement technologies are being implemented in dryland restoration.

ticidas. Estas técnicas incluyen el uso de compostados, acolchados con cubierta vegetal, y biofertilizantes entre otros, (Bateman et al. 2019; Kneller et al. 2018) y estudios recientes destacan que su aplicación combinada puede ser más efectiva para mejorar la fertilidad de suelo (Hueso-González et al. 2018). Además, las enmiendas y fertilizantes orgánicos parecen ser generalmente más efectivos para incrementar los contenidos de carbono en suelos comprados con los fertilizantes de origen mineral (Hueso-González et al. 2016).

La aplicación de enmiendas orgánicas en suelos áridos no solo aumenta el contenido de carbono orgánico total y sus diferentes fracciones, sino que también puede afectar positivamente a las comunidades microbianas (Bastida et al. 2015; Zhu et al. 2017). Se ha estimado que los residuos orgánicos, con un contenido aproximado de 45% de carbono pueden favorecer la actividad microbiana y enzimática, mejorando además las propiedades químicas del suelo y la disponibilidad de nutrientes en zonas secas (Luna et al. 2016; Meena et al. 2020). Aunque a corto plazo se ha observado un aumento del carbono orgánico y un cambio en la diversidad microbiana (Soria et al. 2021), estos efectos han sido menos estudiados a largo plazo (Bastida et al. 2017). El avance en técnicas moleculares tales como herramientas genómicas han permitido conocer en mayor detalle las implicaciones del uso de distintos tipos de enmiendas orgánicas en la complejidad de la diversidad biológica y en los ciclos biogeoquímicos. Por ejemplo, en un estudio reciente, Rodríguez-Berbel et al. (2021) observaron que suelos restaurados con lodos de depuradora, con un alto contenido en materia orgánica lábil, favorecen la producción de bacterias copiótrofas, las cuales juegan un papel fundamental en los ciclos del carbono. En cambio, se observó una mayor diversidad microbiana en suelos con compost de residuos vegetales, con materia orgánica más resiliente y menos biodegradable, lo cual puede favorecer una actividad microbiológica más escalonada, garantizando una liberación más lenta de los nutrientes esenciales para el suelo (Rodríguez-Berbel et al. 2021).

El biocarbono o biochar es un residuo con alto contenido en carbono que se produce mediante procesos de pirólisis a partir de biomasa vegetal y/o animal (Purakayastha et al. 2015). Su uso en suelos degradados se ha expandido en los últimos años en las zonas secas para mejorar la fertilidad del suelo (Li et al. 2020; Romero et al. 2021). Su popularidad se ha debido principalmente a su potencial como herramienta para el secuestro de carbono, ya que el carbono que aporta el biochar es más estable y recalcitrante que el de otras enmiendas orgánicas como el abono o estiércol (Irfan et al. 2019). Aunque hay resultados contrastados, en general se ha reconocido su estabilidad, la cual se atribuye a su contenido aromático condensado (Purakayastha et al. 2015; De la Rosa et al. 2018). En suelos con bajo contenido de carbono orgánico, tales como los de las zonas secas, los efectos del biochar se puede ver amplificados por los aportes adicionales de carbono a través de una mayor productividad asociada de la planta (Li et al. 2020). Los efectos de la aplicación de biochar en la biota del suelo dependen en gran medida de sus propiedades (Lehmann et al. 2011). En principio, el biochar podría proporcionar un hábitat adecuado para los microorganismos ya que tiene el potencial de mejorar la aireación del suelo, reducir la compactación e incrementar el contenido de agua además de suministrar nutrientes (Soong et al. 2107; Zhu et al. 2017). Aunque los resultados son contradictorios, ya que algunos estudios han visto un efecto positivo del biochar en la actividad microbiana en suelos con bajo contenido en nutrientes (Zhang et al. 2018), también se ha observado un un impacto negativo en la abundancia microbiana (Andrés et al. 2019).

El uso de biofertilizantes basados en inóculos compuestos por microorganismos podría ser clave para frenar los impactos de la degradación y el cambio climático en los suelos de las zonas secas (Requena et al. 2001; Ayangbenro y Babalola 2020; Jansson y Hofmockel 2020). Estudios recientes destacan el potencial de organismos promotores del crecimiento vegetal tolerantes al estrés

(Armada et al. 2018; Niu et al. 2018), no solo por su papel para estimular crecimiento vegetal, sino por su contribución al secuestro de carbono, la fijación de nitrógeno, la solubilización de nutrientes como el fosfato y el potasio, el secuestro de hierro (por sideróforos bacterianos) y la remediación de suelos contaminados afectados por salinidad (Rashid et al. 2016). Los microorganismos rizosféricos pueden funcionar como sumideros de carbono a través de la absorción del carbono exportado de las raíces de las plantas, que puede almacenarse como biomasa o convertirse en metabolitos estables. Esta biomasa y metabolitos pueden estabilizarse y eventualmente formar carbono orgánico recalcitrante del suelo mediante agregación y formación de complejos organominerales (Ayangbenro y Babalola 2020). En estudios recientes en zonas áridas, se han usado bacterias pertenecientes a los géneros *Arthrobacter*, *Microbacterium*, *Planococcus*, *Rhodococcus* y *Streptomyces* para fijar CO₂ atmosférico a través de su conversión a precipitados de carbonato de calcio (Liu et al. 2018; Liu et al. 2020).

El uso de microbios de vida libre y organismos componentes de las costras biológicas o biocostras (comunidades de cianobacterias, algas, hongos, líquenes, musgos y microorganismos) como biofertilizantes y restauradores del suelo, ha ganado atención en los últimos años (Roncero-Ramos et al. 2019; Wang et al. 2020). Estos organismos realizan funciones biológicas y ecológicas cruciales para las zonas secas como la fijación de nitrógeno, y la agregación de las partículas del suelo por liberación de exopolisacáridos (Adessi et al. 2021; Chamizo et al. 2020), que también se ha observado en arqueas y bacterias en ambientes extremos, incluyendo las zonas áridas (Naseem et al. 2018). Estas sustancias protegen a los microorganismos de la desecación y del estrés osmótico al mejorar la retención de agua y controlar la difusión de compuestos orgánicos, pero además favorece al secuestro de carbono en suelos a través de la mejora en la absorción de nutrientes (Kumar et al. 2019).

Debido a que tienen la capacidad de dispersarse (Marshall y Chalmers 1997) y que son organismos poiquilohídricos, -organismos tolerantes a la desecación capaces de reactivar su metabolismo tras la rehidratación- las cianobacterias pueden establecerse en suelos desnudos en hábitats con estrés abiótico (Rajeev et al. 2013; Giraldo-Silva et al. 2020; Machado de Lima et al. 2021). Además de su papel en la mejora de la estructura y estabilidad del suelo, controlando la erosión, las cianobacterias formadoras de biocostras pueden fijar carbono y nitrógeno en el suelo, ya que son las únicas procariontes que realizan una fotosíntesis oxigenada similar a la de las plantas (Rocha et al. 2020; Wang et al. 2020). Estudios recientes han destacado la capacidad de las cianobacterias para incrementar los niveles de carbono en suelos de zonas áridas sometidos a procesos erosivos (Roman et al. 2018; Kheirfam 2020), afectados por incendios (Chamizo et al. 2020; Muñoz-Rojas et al. 2021b) y afectados por procesos extractivos como minería a cielo abierto (Muñoz-Rojas et al. 2018). Por todo esto, se han empezado a desarrollar nuevas metodologías para aislar, cultivar artificialmente e inocular cianobacterias y otros organismos de la biocostra con el fin de reestablecer la fertilidad de suelos degradados en zonas áridas (Faist et al. 2019; Chua et al. 2020; Roman et al. 2020) (Fig. 3).

A pesar del potencial de la inoculación de microorganismos cultivados *ex situ* para promover el secuestro de carbono orgánico y mejorar la biodiversidad del suelo, existen pocos estudios que analicen su impacto en las comunidades nativas de microorganismos residentes. El uso de cepas comerciales de distintos microorganismos puede resultar en una pérdida de la biodiversidad, ya que estas conllevan una selección genética de un número reducido de especies que pueden ser agresivas con las nativas residentes (Hart et al. 2017; Moreira-Grez et al. 2019). Por el contrario, la mayoría de los estudios recientes apuntan a que el uso de especies nativas de bacterias y hongos, previamente aisladas del suelo a restaurar, interaccionan de manera positiva con los organismos residentes en el suelo (Roncero-Ramos et al. 2019). Las futuras aplicaciones de estas técnicas deberían considerar estos aspectos.

Conclusiones y perspectivas futuras

En definitiva, el contenido y calidad de carbono orgánico en el suelo, así como su biodiversidad son factores clave para la sostenibilidad de las zonas secas a escala global. Uno proporciona los recursos necesarios, y el otro la maquinaria que apoya el funcionamiento del ecosistema y su capacidad para proporcionar un sinfín de servicios ecosistémicos, desde el mantenimiento de la fertilidad del suelo, a la capacidad para producir alimentos y la regulación del clima. Estos factores son extremadamente vulnerables al cambio climático y a los procesos de degradación y desertificación. En este sentido, la FAO ha destacado recientemente que una de las mayores amenazas para la biodiversidad del suelo, en concreto en las zonas secas, es la pérdida de carbono y materia orgánica, lo cual está directamente asociado a otros impactos tales como la deforestación o la intensificación de la agricultura (FAO 2020).

Los estudios más recientes confirman que las distintas especies microbianas del suelo están íntimamente relacionadas a la calidad de la materia orgánica y contribuyen de manera única a su degradación y secuestro en el suelo (Zhang et al. 2021). En escenarios actuales y futuros de cambio global estos procesos van a depender de la sensibilidad de los organismos del suelo a cambios ambientales (Dacal et al. 2019; Fan et al. 2021) lo cual determinara su capacidad para utilizar las diferentes fuentes de materia orgánica en el suelo y, por tanto, de la acumulación de carbono. Así, en los últimos años se están proponiendo nuevos paradigmas para actualizar los modelos de carbono que existían hasta ahora, integrando la actividad de las comunidades microbianas como parte fundamental de los procesos de mineralización y descomposición (Soong et al. 2020). A pesar de que sabemos que estos procesos se verán afectados por los impactos del cambio global, aun no conocemos el alcance real de los mismos en suelo, sobre todo en las capas inferiores de su perfil (Lehmann et al. 2020). Futuros estudios deberían ayudar a entender mejor las funciones específicas de los organismos del suelo que habitan las zonas secas, por ejemplo, mediante genómica funcional, y a identificar la gran mayoría que están aún por descubrir. Un mayor conocimiento del papel de la biodiversidad del suelo y su conexión con el ciclo de carbono podrá ayudar no solo a entender la sensibilidad de estos procesos a la degradación y al cambio climático, sino a diseñar estrategias para revertir sus efectos.

Nuevos avances en las estrategias de monitoreo que incluyan las distintas fracciones de carbono y biodiversidad del suelo a diversas escalas serán clave para frenar el avance de la desertificación (Muñoz-Rojas 2018). Por ejemplo, se ha destacado en numerosos estudios la importancia de usar bioindicadores a nivel de especies de organismos de suelos, tales como nemátodos, artrópodos o lombrices, además de microorganismos para el monitoreo de la fertilidad del suelo (Li et al. 2021). También se ha propuesto recientemente el uso de taxones 'raros' no comunes a cada suelo que, a pesar de su escasa abundancia, pueden ser muy relevantes para identificar procesos de degradación en suelos de zonas secas, y actuar como bioindicadores (Wu et al. 2021). El avance de nuevos enfoques y tecnologías para el uso de microbiomas del suelo en la lucha contra la degradación de suelos y desertificación es prometedor. Actualmente se están desarrollando numerosas aplicaciones biotecnológicas y de ingeniería microbiana (además de manipulaciones in situ). No obstante, aún deben superarse barreras para la implementación de estos métodos en condiciones naturales y a gran escala (Maestre et al. 2017; Roman et al. 2020). Por ejemplo, algunos de los principales problemas que se han identificado son la falta de adaptación local de los organismos inoculados si estos son exógenos al sistema (Moreira-Grez et al. 2019) y la evolución de los mismos en condiciones de campo a largo plazo (Giraldo-Silva et al. 2020).

Conservar los suelos para las siguientes generaciones, y aprender a desarrollar su capacidad para aumentar el secuestro de carbono y la biodiversidad del suelo, será fundamental para asegurar la funcionalidad de las zonas secas y mitigar los impactos antropogénicos,

sumados a los eventos climáticos extremos naturales y los promovidos por el calentamiento global. La década de 2021-2030, denominada década de la restauración por la Naciones Unidas, será fundamental para la protección y restauración de las zonas secas degradadas de todo el mundo (<https://www.decade-onrestoration.org>). Este reto requerirá una mejor gestión de los ecosistemas terrestres, incluyendo el monitoreo, la conservación y la restauración de los suelos (Fischer et al. 2020; Guerra et al. 2021). A día de hoy, existen numerosas barreras que deben superarse para la implementación de las distintas prácticas de manejo que promuevan suelos y ecosistemas productivos, funcionales y sostenibles en las zonas secas. Estas barreras incluyen aspectos financieros, técnicos, logísticos, institucionales y socioculturales, además de biofísicos.

Contribución de los autores

MMR: Redacción - borrador original, Redacción – Revisión y edición. MDB: Redacción - borrador original, Redacción – Revisión y edición. MELB: Redacción - borrador original, Redacción – Revisión y edición.

Agradecimientos

La investigación de MMR está financiada por el Australian Research Council Discovery Early Career Research Award (DE180100570) y la Hermon Slade Foundation (HSF18-8). La investigación de M.D-B. está apoyada por un proyecto I+D+i 2020 del Ministerio de Ciencia e Innovación de España (PID2020-115813RA-I00), y un proyecto PAIDI 2020 de la Junta de Andalucía (P20_00879). MELB recibe financiación de la Universidad de Castilla La Mancha.

Referencias

- Adessi, A., De Philippis, R., Rossi, F. 2021. Drought-tolerant cyanobacteria and mosses as biotechnological tools to attain land degradation neutrality. *Web Ecology* 21(1):65-78.
- Aguilera, E., Lassaletta, L., Gattinger, A., Gimeno, B. 2013. Managing soil carbon for climate change mitigation and adaptation in Mediterranean cropping systems: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 168:25-36.
- Almendros, G., Hernández, Z., Sanz, J., Rodríguez-Sánchez, S., Jiménez-González, M.A., González-Pérez, J.A. 2018. Graphical statistical approach to soil organic matter resilience using analytical pyrolysis data. *Journal of Chromatography A* 1533:164-173.
- Andrés, P., Rosell-Melé, A., Colomer-Ventura, F., Deneff, K., Cotrufo, M.F., Riba, M., Alcañiz, J.M. 2019. Belowground biota responses to maize biochar addition to the soil of a Mediterranean vineyard. *Science of the total environment* 660:1522-1532.
- Armada, E., Leite, M.F., Medina, A., Azcón, R., Kuramae, E.E. 2018. Native bacteria promote plant growth under drought stress condition without impacting the rhizomicrobiome. *FEMS microbiology ecology* 94(7) fy092.
- Ayangbenro, A.S., Babalola, O.O. 2020. Reclamation of arid and semi-arid soils: The role of plant growth-promoting archaea and bacteria. *Current Plant Biology* 100173.
- Bach, E.M., Ramirez, K.S., Fraser, T.D., Wall, D.H. 2020. Soil Biodiversity Integrates Solutions for a Sustainable Future. *Sustainability* 12, 2662
- Bardgett, R.D., Van Der Putten, W.H. 2014. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature* 515(7528):505-511.
- Bastida, F., Selevsek, N., Torres, I.F., Hernández, T., García, C. 2015. Soil restoration with organic amendments: linking cellular functionality and ecosystem processes. *Scientific Reports* 5(1):1-12.
- Bastida, F., Torres, I.F., Hernández, T., García, C. 2017. The impacts of organic amendments: do they confer stability against drought on the soil microbial community? *Soil Biology and Biochemistry* 113:173-183.
- Bateman, A.M., Muñoz-Rojas, M. 2019. To whom the burden of soil degradation and management concerns. En: Pereira, P. (ed.). *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection, Vol. 4: Soil Degradation, Restoration and Management in a Global Change Context*, pp. 1-22. Academic Press, Elsevier.

- Bateman, A.M., Erickson, T.E., Merritt, D.J., Veneklaas, E.J., Muñoz-Rojas, M. 2019. Water availability drives the effectiveness of inorganic amendments to increase plant growth and substrate quality. *Catena* 182:104116.
- Berdugo, M., Delgado-Baquerizo, M., Soliveres, S., Hernández-Clemente, R., Zhao, Y., Gaitán, J.J., et al. 2020. Global ecosystem thresholds driven by aridity. *Science* 367(6479):787-790.
- Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., et al. 2018. Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120:105-125.
- Burrell, L.D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., Soja, G. 2016. Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma* 282:96-102.
- Cano-Díaz, C., Maestre, F.T., Eldridge, D.J., Singh, B.K., Bardgett, R.D., Fierer, N., Delgado-Baquerizo, M. 2020. Contrasting environmental preferences of photosynthetic and non-photosynthetic soil cyanobacteria across the globe. *Global Ecology and Biogeography* 29(11): 2025-2038.
- Chamizo, S., Adessi, A., Certini, G., De Philippis, R. 2020. Cyanobacteria inoculation as a potential tool for stabilization of burned soils. *Restoration Ecology* 28:S106-S114.
- Chua, M., Erickson, T.E., Merritt, D.J., Chilton, A.M., Ooi, M.K., Muñoz-Rojas, M. 2020. Bio-priming seeds with cyanobacteria: effects on native plant growth and soil properties. *Restoration Ecology*, 28, S168-S176.
- Cowie, A.L., Penman, T.D., Gorissen, L., Winslow, M.D., Lehmann, J., Tyrrell, T.D., et al. 2011. Towards sustainable land management in the drylands: scientific connections in monitoring and assessing dryland degradation, climate change and biodiversity. *Land Degradation and Development* 22: 248-260.
- Crowther, T.W., Van den Hoogen, J., Wan, J., Mayes, M.A., Keiser, A.D., Mo, L., et al. 2019. The global soil community and its influence on biogeochemistry. *Science* 365(6455).
- Dacal, M., Bradford, M.A., Plaza, C., Maestre, F.T., García-Palacios, P. 2019. Soil microbial respiration adapts to ambient temperature in global drylands. *Nature ecology and evolution* 3(2):232-238.
- Delgado-Baquerizo, M. 2019. Obscure soil microbes and where to find them. *The ISME journal* 13(8):2120-2124.
- Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F.T., Reich, P.B., Jeffries, T.C., Gaitán, J.J., Encinar, D., et al. 2016. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems. *Nature communications* 7(1):1-8.
- Delgado-Baquerizo, M., Eldridge, D.J., Maestre, F., Karunaratne, S.B., Trivedi, P., Reich, P.B., Singh, B.K. 2017. Climate legacies drive global soil carbon stocks in terrestrial ecosystems. *Science Advances* 3(4), e1602008.
- Delgado-Baquerizo, M., Oliverio, A.M., Brewer, T.E., Benavent-González, A., Eldridge, D.J., Bardgett, R.D., et al. 2018. A global atlas of the dominant bacteria found in soil. *Science* 359(6373):320-325.
- Delgado-Baquerizo, M., Reich, P.B., Trivedi, C., Eldridge, D.J., Abades, S., Alfaro, F.D., et al. 2020. Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. *Nature ecology and evolution* 4(2):210-220.
- De la Rosa, J.M., Rosado, M., Paneque, M., Miller, A.Z., Knicker, H. 2018. Effects of aging under field conditions on biochar structure and composition: Implications for biochar stability in soils. *Science of the Total Environment* 613:969-976.
- Egidi, E., Delgado-Baquerizo, M., Plett, J.M., Wang, J., Eldridge, D.J., Bardgett, R.D., et al. 2019. A few Ascomycota taxa dominate soil fungal communities worldwide. *Nature communications* 10(1):1-9.
- Eglinton, T.I., Galy, V.V., Hemingway, J.D., Feng, X., Bao, H., Blattmann, T.M., et al. 2021. Climate control on terrestrial biospheric carbon turnover. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118(8).
- Eldridge, D.J., Delgado-Baquerizo, M., Travers, S.K., Val, J., Oliver, I. 2017. Do grazing intensity and herbivore type affect soil health? Insights from a semi-arid productivity gradient. *Journal of Applied Ecology* 54(3):976-985.
- Faist, A.M., Antoninka, A.J., Belnap, J., Bowker, M.A., Duniway, M.C., Garcia-Pichel, F., et al. 2020. Inoculation and habitat amelioration efforts in biological soil crust recovery vary by desert and soil texture. *Restoration Ecology* 28:S96-S105.
- FAO 2016. *Estado Mundial del Recurso Suelo*. Resumen Técnico. FAO, Roma, Italia.
- FAO, ITPS, GSBI, CBD, EC. 2020. *State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities*, Report 2020. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1928en>
- Fan, X., Gao, D., Zhao, C., Wang, C., Qu, Y., Zhang, J., Bai, E. 2021. Improved model simulation of soil carbon cycling by representing the microbially derived organic carbon pool. *The ISME Journal* 1-16.
- Ferrenberg, S., Faist, A.M., Howell, A., Reed, S.C. 2018. Biocrusts enhance soil fertility and *Bromus tectorum* growth, and interact with warming to influence germination. *Plant and Soil* 429(1):77-90.
- Fierer, N. 2017. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology* 15(10):579-590.
- Fierer, N., Jackson, R.B. 2006. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103(3):626-631.
- Fischer, J., Riechers, M., Loos, J., Martin-Lopez, B., Temperton, V.M. 2020. Making the UN Decade on Ecosystem Restoration a Social-Ecological Endeavour. *Trends in Ecology and Evolution* 36:20-28.
- Franco, A.L.C., Cherubin, M.R., Cerri, C.E.P., Six, J., Wall, D.H., Cerri, C.C. 2020. Linking soil engineers, structural stability, and organic matter allocation to unravel soil carbon responses to land-use change. *Soil Biology and Biochemistry* 150.
- Fu, C., Chen, Z., Wang, G., Yu, X., Yu, G. 2021. A comprehensive framework for evaluating the impact of land use change and management on soil organic carbon stocks in global drylands. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 48:103-109.
- Gaitán, J.J., Bran, D.E., Oliva, G.E., Aguiar, M.R., Buono, G.G., Ferrante, D., et al. 2018. Aridity and overgrazing have convergent effects on ecosystem structure and functioning in Patagonian rangelands. *Land Degradation and Development* 29(2):210-218.
- García-Pichel, F., Loza, V., Marusenko, Y., Mateo, P., Potrafka, R.M. 2013. Temperature drives the continental-scale distribution of key microbes in topsoil communities. *Science* 340(6140):1574-1577.
- Giraldo-Silva, A., Nelson, C., Penfold, C., Barger, N.N., García-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: S187-S193.
- Guerra, C.A., Bardgett, R.D., Caon, L., Crowther, T.W., Delgado-Baquerizo, M., Montanarella, L. et al. 2021. Tracking, targeting, and conserving soil biodiversity. *Science* 371(6526):239-241.
- Hart, M., Antunes, P., Abbott, L. 2017. Unknown risks to soil biodiversity from commercial fungal inoculants. *Nature Ecology and Evolution* 1, 0115.
- Hobley, E.U., Wilson, B. 2016. The depth distribution of organic carbon in the soils of eastern Australia. *Ecosphere* 7: e01214.
- Hoyle, F.C., D'Antuono, M., Overheu, T., Murphy, D.V. 2013. Capacity for increasing soil organic carbon stocks in dryland agricultural systems. *Soil Research*, 51(8):657-667.
- Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G., Guo, R. 2016. Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change* 6:166-171.
- Huang, J., Yu, H., Dai, A., Wei, Y., Kang, L. 2017. Drylands face potential threat under 2 °C global warming target. *Nature Climate Change* 7:417-422.
- Hueso-González, P., Martínez-Murillo, J.F., Ruiz Sinoga, J.D. 2016. Effects of topsoil treatments on afforestation in a dry-Mediterranean climate (Southern Spain). *Solid Earth* 7:1479-2016.
- Hueso-González, P., Muñoz-Rojas, M., Martínez-Murillo, J.F. 2018. The role of organic amendments in drylands restoration. *Current Opinion in Environmental Science and Health* 5:1-6.
- Irfan, M., Hussain, Q., Khan, K.S., Akmal, M., Ijaz, S.S., Hayat, R., et al. 2019. Response of soil microbial biomass and enzymatic activity to biochar amendment in the organic carbon deficient arid soil: a 2-year field study. *Arabian Journal of Geosciences* 12(3):95.
- Jansson, J.K., Hofmockel, K.S. 2020. Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology* 18(1): 35-46.
- Jordán, A., Zavala, L.M., Muñoz-Rojas, M. 2011. Mulching, effects on soil physical properties. En: Głinski, J., Horabik, J., Lipiec, J. (eds.), *Encyclopedia of Agrophysics*, pp. 492-496. Springer, Berlin, Alemania.
- Jiménez-González, M.A., Álvarez, A.M., Carral, P., González-Pérez, J.A., Al-mendros, G. 2020. Climate variability in Mediterranean ecosystems is reflected by soil organic matter pyrolytic fingerprint. *Geoderma* 374:114443.
- Khalil, M.I., Francaviglia, R., Henry, B., Klumpp, K., Koncz, P., Llorente, M., et al. 2019. Strategic management of grazing grassland systems to maintain and increase organic carbon in soils. En: Almeida, L. (eds.), *CO2 Sequestration*. Intechopen, Londres, Reino Unido.
- Kheirfam, H. 2020. Increasing soil potential for carbon sequestration using microbes from biological soil crusts. *Journal of Arid Environments* 172:104022.

- Kneller, T., Harris R.J., Bateman, A., Muñoz-Rojas, M. 2018. Native-plant amendments and topsoil addition enhance soil function in post-mining arid grasslands. *Science of the total environment* 621(2018): 744-752.
- Kumar, M., Kumar, M., Pandey, A., Thakur, I.S. 2019. Genomic analysis of carbon dioxide sequestering bacterium for exopolysaccharides production. *Scientific reports* 9(1):1-12.
- Laban, P., Metternicht, G., Davies, J. 2018. Biodiversidad de suelos y carbono orgánico en suelos: cómo mantener vivas las tierras áridas. UICN, Gland, Suiza.
- Lal, R. 2019. Carbon cycling in global drylands. *Current climate change reports* 5(3): 221-232.
- Lavallee, J.M., Soong, J.L., Cotrufo, M.F. 2020. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology* 26(1): 261-273.
- Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota—a review. *Soil biology and biochemistry* 43(9), 1812-1836.
- Lehmann, J., Hansel, C. M., Kaiser, C., Kleber, M., Maher, K., Manzonei, S., et al. 2020. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nature Geoscience* 13(8): 529-534.
- Li, FR., Liu, J.L., Ren, W., Liu, L.L. 2018. Land-use change alters patterns of soil biodiversity in arid lands of northwestern China. *Plant Soil* 428:371–388.
- Li, P., Wu, M., Kang, G., Zhu, B., Li, H., Hu, F., Jiao, J. 2020. Soil quality response to organic amendments on dryland red soil in subtropical China. *Geoderma* 373:114416.
- Li, Y., Wang, J., Shao, M. A. 2021. Assessment of earthworms as an indicator of soil degradation: A case-study on loess soils. *Land Degradation and Development* 32:2606-2617.
- Lian, X., Piao, S., Chen, A., Huntingford, C., Fu, B., Li, L.Z.X., et al. 2021. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world. *Nature Reviews Earth and Environment* 2:232–250.
- Liu, Z., Zhang, Y., Fa, K., Zhao, H., Qin, S., Yan, R., Wu, B. 2018. Desert soil bacteria deposit atmospheric carbon dioxide in carbonate precipitates. *Catena* 170:64-72.
- Liu, Z., Sun, Y., Zhang, Y., Qin, S., Sun, Y., Mao, H., Miao, L. 2020. Desert soil sequesters atmospheric CO₂ by microbial mineral formation. *Geoderma* 361:114104.
- Lugato, E., Lavallee, J.M., Haddix, M.L., Panagos, P., Cotrufo, M.F. 2021. Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter. *Nature Geoscience* 1-6.
- Luna, L., Pastorelli, R., Bastida, F., Hernández, T., García, C., Miralles, I., Solé-Benet, A. 2016. The combination of quarry restoration strategies in semiarid climate induces different responses in biochemical and microbiological soil properties. *Applied Soil Ecology* 107:33-47.
- Machado de Lima, N.M., Muñoz-Rojas, M., Vázquez-Campos, X., Branco, L.H.Z. 2021. Biocrust cyanobacterial composition, diversity, and environmental drivers in two contrasting climatic regions in Brazil. *Geoderma* 386:114914
- Maestre, F.T., Delgado-Baquerizo, M., Jeffries, T.C., Eldridge, D.J., Ochoa, V., Singh, B.K. 2015. Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112:15684-15689.
- Maestre, F.T., Sole, R., Singh, B.K. 2017. Microbial biotechnology as a tool to restore degraded drylands. *Microbial biotechnology* 10(5), 1250-1253.
- Marshall, W.A., Chalmers, M.O. 1997. Airborne dispersal of Antarctic terrestrial algae and cyanobacteria. *Ecography*, 20(6), 585-594.
- Meena, R.S., Lal, R., Yadav, G.S. 2020. Long-term impacts of topsoil depth and amendments on soil physical and hydrological properties of an Alfisol in central Ohio, USA. *Geoderma* 363:114164.
- Mohammadipanah, F., Wink, J. 2016. Actinobacteria from arid and desert habitats: diversity and biological activity. *Frontiers in microbiology* 6:1541.
- Moreira-Grez, B., Muñoz-Rojas, M., Kariman, K., Storer, P., O'Donnell, A. G., Kumaresan, D., Whiteley, A.S. 2019. Reconditioning degraded mine site soils with exogenous soil microbes: plant fitness and soil microbiome outcomes. *Frontiers in microbiology* 10:1617.
- Muñoz-Rojas, M. 2018. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science and Health* 5:47-52.
- Muñoz-Rojas, M., Jordán, A., Zavala, L.M., De la Rosa, D., Abd-Elmabod, S.K., Anaya-Romero, M. 2015. Impact of land use and land cover changes on organic carbon stocks in Mediterranean soils (1956–2007). *Land Degradation and Development* 26:168-179.
- Muñoz-Rojas, M., Román, J.R., Roncero-Ramos, B., Erickson, T.E., Merritt, D.J., Aguila-Carricondo, P., Cantón, Y. 2018. Cyanobacteria inoculation enhances carbon sequestration in soil substrates used in dryland restoration. *Science of the Total Environment* 636:1149-1154.
- Muñoz-Rojas, M., Hueso-Gonzalez, P., Branquinho, C., Baumgartl, T. 2021a. Restoration and rehabilitation of degraded land in arid and semi-arid environments. *Land Degradation and Development* 32:3-6.
- Muñoz-Rojas, M., de Lima, N.M., Chamizo, S., Bowker, M.A. 2021b. Restoring post-fire ecosystems with biocrusts: living, photosynthetic soil surfaces. *Current Opinion in Environmental Science and Health* 100273.
- Naseem, H., Ahsan, M., Shahid, M.A., Khan, N. 2018. Exopolysaccharides producing rhizobacteria and their role in plant growth and drought tolerance. *Journal of basic microbiology* 58(12):1009-1022.
- Neilson, J.W., Califf, K., Cardona, C., Copeland, A., Van Treuren, W., Josephson, K.L., et al. 2017. Significant impacts of increasing aridity on the arid soil microbiome. *MSystems* 2(3).
- Niu, X., Song, L., Xiao, Y., Ge, W. 2018. Drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria associated with foxtail millet in a semi-arid agroecosystem and their potential in alleviating drought stress. *Frontiers in microbiology* 8: 2580.
- Ochoa-Hueso, R., Collins, S.L., Delgado-Baquerizo, M., Hamonts, K., Pockman, W.T., Sinsabaugh, R.L., et al. 2018. Drought consistently alters the composition of soil fungal and bacterial communities in grasslands from two continents. *Global change biology* 24(7):2818-2827.
- Oliverio, A.M., Geisen, S., Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F.T., Turner, B.L., Fierer, N. 2020. The global-scale distributions of soil protists and their contributions to belowground systems. *Science advances* 6(4): eaax8787.
- Pereira, P., Bogunovic, I., Munoz-Rojas, M., Brevik, E.C. 2018. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science and Health* 5:7-13.
- Plaza, C., Zaccaro, C., Sawicka, K., Méndez, A.M, Tarquis, A., Gascó, G. et al. 2018. Soil resources and element stocks in drylands to face global issues. *Scientific Reports* 8:13788.
- Pries, C.E.H., Castanha, C., Porras, R.C., Torn, M.S. 2017. The whole-soil carbon flux in response to warming. *Science* 355(6332):1420-1423.
- Purakayastha, T.J. Kumari S, Pathak, H. 2015. Characterisation, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues. *Geoderma* 239-240:293-303.
- Rajeev, L., Da Rocha, U.N., Klitgord, N., Luning, E.G., Fortney, J., Axen, S.D., et al. 2013. Dynamic cyanobacterial response to hydration and dehydration in a desert biological soil crust. *The ISME journal* 7(11):2178-2191.
- Ramos, J.L., Lansac, R. 2020. Caring soils for sustainable land uses. *Microbial Biotechnology* 13(5):1309-1310.
- Rashid, M.I., Mujawar, L.H., Shahzad, T., Almeelbi, T., Ismail, I.M., Oves, M. 2016. Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. *Microbiological research* 183:26-41.
- Reed, S.C., Coe, K.K., Sparks, J.P., et al. 2012. Changes to dryland rainfall result in rapid moss mortality and altered soil fertility. *Nature Climate Change* 2:752– 55.
- Remke, M.J., Johnson, N.C., Wright, J., Williamson, M., Bowker, M.A. 2021. Sympatric pairings of dryland grass populations, mycorrhizal fungi and associated soil biota enhance mutualism and ameliorate drought stress. *Journal of Ecology* 109(3):1210-1223.
- Requena, N., Perez-Solis, E., Azcón-Aguilar, C., Jeffries, P., Barea, J-M. 2001. Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems. *Applied and Environmental Microbiology* 67:495-498.
- Rocha, F., Esteban Lucas-Borja, M., Pereira, P., Muñoz-Rojas, M. 2020. Cyanobacteria as a Nature-Based Biotechnological Tool for Restoring Salt-Affected Soils. *Agronomy* 10(9):1321.
- Rodríguez-Berbel, N., Soria, R., Ortega, R., Bastida, F., Miralles, I. 2021. Quarry restoration treatments from recycled waste modify the physico-chemical soil properties, composition and activity of bacterial communities and priming effect in semi-arid areas. *Science of The Total Environment* 774:145693.

- Román, J.R., Roncero-Ramos, B., Chamizo, S., Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y. 2018. Restoring soil functions by means of cyanobacteria inoculation: importance of soil conditions and species selection. *Land Degradation and Development* 29(9):3184-3193.
- Román, J.R., Chilton, A. M., Cantón, Y., Muñoz-Rojas, M. 2020. Assessing the viability of cyanobacteria pellets for application in arid land restoration. *Journal of Environmental Management* 270: 110795.
- Romero, C.M., Chunli, L.I., Owens, J., Ribeiro, G.O., Mcallister, T.A., Okine, E., Xiyong, H.A.O. 2021. Nutrient cycling and greenhouse gas emissions from soil amended with biochar-manure mixtures. *Pedosphere* 31(2):289-302.
- 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 235 Nostoc commune inoculation success. *Plant Soil* 444: 57–70.
- Schlesinger, W. H., Amundson, R. 2019. Managing for soil carbon sequestration: Let's get realistic. *Global Change Biology* 25(2):386-389.
- Soong, J.L., Dam, M., Wall, D.H., Cotrufo, M.F. 2017. Below-ground biological responses to pyrogenic organic matter and litter inputs in grasslands. *Functional Ecology* 31(1): 260-269.
- Soong, J.L., Fuchslueger, L., Marañón-Jimenez, S., Torn, M.S., Janssens, I.A., Penuelas, J., Richter, A. 2020. Microbial carbon limitation: the need for integrating microorganisms into our understanding of ecosystem carbon cycling. *Global change biology* 26(4):1953-1961.
- Soria, R., Ortega, R., Bastida, F., Miralles, I. 2021. Role of organic amendment application on soil quality, functionality and greenhouse emission in a limestone quarry from semiarid ecosystems. *Applied Soil Ecology* 164:103925.
- Stock, E., Standish, R.J., Muñoz-Rojas, M., Bell, R.W., Erickson, T.E. 2020. Field-Deployed extruded seed pellets show promise for perennial grass establishment in arid zone mine rehabilitation. *Frontiers in Ecology and Evolution* 8:447.
- Tedersoo, L., Bahram, M., Pöhlme, S., Kõljalg, U., Yorou, N.S., Wijesundera, R., et al. K. 2014. Global diversity and geography of soil fungi. *Science* 346:6213.
- Tedersoo, L., Bahram, M., Zobel, M. 2020. How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. *Science* 367(6480).
- Timmis, K., Ramos, J.L. 2021. The soil crisis: the need to treat as a global health problem and the pivotal role of microbes in prophylaxis and therapy. *Microbial Biotechnology* 4(3):769-797.
- Trivedi, C., Delgado-Baquerizo, M., Hamonts, K., Lai, K., Reich, P.B., Singh, B.K. 2019. Losses in microbial functional diversity reduce the rate of key soil processes. *Soil Biology and Biochemistry* 135:267-274.
- UNCCD 1994. *Elaboration of an international convention to combat desertification in countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa (A/AC.241/27)*. United Nations, New York, Estados Unidos.
- Van den Hoogen, J., Geisen, S., Routh, D., Ferris, H., Traunspurger, W., Wardle, D.A., de Goede, R.G.M., et al. 2019. Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. *Nature* 572:194–198.
- Vasar, M., Davison, J., Sepp, S.-K., Öpik, M., Moora, M., Koorem, K., et al. 2021. Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in the Soils of Desert Habitats. *Microorganisms* 9, 229
- Verbruggen, E., Sheldrake, M., Bainard, L. D., Chen, B., Ceulemans, T., De Gruyter, J., Van Geel, M. 2018. Mycorrhizal fungi show regular community compositions in natural ecosystems. *The ISME journal* 12(2): 380-385.
- Vicca, S., Bahn, M., Estiarte, M., Van Loon, E. E., Vargas, R., Alberti, G., et al. 2014. Can current moisture responses predict soil CO₂ efflux under altered precipitation regimes? A synthesis of manipulation experiments. *Biogeosciences* 11(11):2991-3013.
- Yang, Y., Tilman, D., Furey, G., Lehman, C. 2019. Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. *Nature communications* 10(1):1-7.
- Wagg, C., Bender, S.F., Widmer, F., van der Heijden, M. 2014. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111(14):5266- 5270.
- Wang, J., Zhang, P., Bao, J.T., Zhao, J.C., Song, G., Yang, H.T., et al. 2020. Comparison of cyanobacterial communities in temperate deserts: A cue for artificial inoculation of biological soil crusts. *Science of The Total Environment* 745:140970.
- Willaerts, B.A., Oyonarte, C., Muñoz-Rojas, M., Ibáñez, J.J., Aguilera, P.A. 2016. Environmental factors controlling soil organic carbon stocks in two contrasting Mediterranean climatic areas of southern Spain. *Land Degradation and Development* 27:603-611.
- Wu, Y., Chen, D., Saleem, M., Wang, B., Hu, S., Delgado-Baquerizo, M., Bai, Y. 2021. Rare soil microbial taxa regulate the negative effects of land degradation drivers on soil organic matter decomposition. *Journal of Applied Ecology*. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13935>
- Zhang, L., Jing, Y., Xiang, Y., Zhang, R., Lu, H. 2018. Responses of soil microbial community structure changes and activities to biochar addition: a meta-analysis. *Science of the Total Environment* 643:926-935.
- Zhang, S., Fang, Y., Luo, Y., Li, Y., Ge, T., Wang, Y., et al. 2021. Linking soil carbon availability, microbial community composition and enzyme activities to organic carbon mineralization of a bamboo forest soil amended with pyrogenic and fresh organic matter. *Science of The Total Environment* 801, 149717.
- Zhu, X., Chen, B., Zhu, L., Xing, B. 2017. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: a review. *Environmental Pollution* 227:98-115.