

Contenido

Introducción	1
Restauración de espacios degradados.....	1
Taludes de infraestructura lineal	2
Establecimiento de la vegetación	3
Briofitos	4
Objetivos.....	6
Zona de estudio.....	6
Material y métodos	9
Recolección e identificación de las especies de la zona de estudio.....	9
Preparación y cultivo del material	10
- Limpieza y secado del material briofítico	10
-Preparación de la solución nutritiva	10
- Cultivo y mantenimiento	11
Diseño experimental.....	11
- Diseño de muestreo y muestreo fotográfico del cultivo	12
Análisis de datos.....	13
- Análisis fotográfico	13
- Análisis estadísticos.....	14
-Análisis de suelo	14
Resultados	15
Diversidad briofítica.....	15
Desarrollo del cultivo	21
Análisis de suelo.....	24
Discusión	24
Diversidad briofítica.....	24
Costra biológica eficiente y resiliente	25
Propuestas interesantes para restauración	27
Conclusiones	28
Referencias.....	29
Anexo I.....	31
Anexo II.....	32

RESUMEN: El potencial de los briofitos como agentes de restauración ecológica todavía se encuentra poco estudiado a día de hoy. Por este motivo, decidimos llevar a cabo un cultivo experimental de musgo desde el contexto de la restauración de un talud de carretera degradado para estudiar la eficacia del cultivo de costra biológica y así probar la viabilidad de una estrategia de restauración ecológica que tuviera como protagonista a los briofitos. Para ello realizamos estudio previo de la zona y su diversidad briofítica para posteriormente diseñar un cultivo semicontrolado en el que pudimos observar el desarrollo de la costra biológica y como las características de la zona condicionan este. Nuestros resultados muestran que, incluso con poco material briofítico y en condiciones desafiantes, el musgo fue capaz de colonizar un porcentaje considerable del sustrato. Además observamos el efecto negativo de la inclinación, la erosión y las propiedades físicas del sustrato arcilloso sobre la colonización del terreno por la costra biológica. El cultivo llevado a cabo demostró que la costra biológica puede ser un gran aliado en la restauración ecológica dando soluciones eficaces y de bajo coste frente a problemáticas recurrentes en los espacios degradados.

PALABRAS CLAVE: Costra biológica, cultivo de musgo, espacios degradados, restauración ecológica, taludes de infraestructuras lineales.

ABSTRACT: The potential of bryophytes as ecological restoration agents is still scarcely studied to date. For this reason, we decided to perform an experimental moss culture in the context of the restoration of a degraded road slope in order to study the effectiveness of biological crust culture and thus test the viability of an ecological restoration strategy with bryophytes as the protagonist. For this purpose, we carried out a preliminary study of the area and its bryophyte diversity to later design a semi-controlled culture in which we were able to observe the development of the biological crust and how the conditions of the area conditioned this. Our results show that, even with low bryophyte material and under challenging conditions, the moss was able to colonize a considerable percentage of the substrate. We also observed the negative effect of slope, erosion and the physical properties of the clay substrate on the colonization of the soil by the biological crust. The cultivation carried out showed that the biological crust can be a great ally in ecological restoration, providing effective and low-cost solutions to recurrent problems in degraded areas.

KEY WORDS: Biological crust, degraded spaces, ecological restoration, linear infrastructure slopes, moss cultivation.

Introducción

Restauración de espacios degradados

La degradación de los ecosistemas y pérdida de biodiversidad ligada a la actividad humana es un hecho más que patente en el mundo actual. Todo ello causado por una industrialización muy intensa y sin ninguna consideración por el medio natural, este deterioro ha generado enormes daños tanto a la salud del planeta como a la calidad de vida y bienestar humanos, ya que ambos se encuentran estrechamente ligados.

Actualmente, los datos sobre estos impactos son sobrecogedores. Según la Lista Roja de las especies de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, de las más de 150.000 especies que han evaluado 42.100 de las mismas se encuentran en mayor o menor grado amenazadas de extinción, esto representa el 28% del total (UICN, 2020). En lo referente a los ecosistemas, aunque escasos, los datos todavía son igual de alarmantes. Según la Lista Roja de los ecosistemas de la UICN, solo en Europa, un 36% de los ecosistemas terrestres y de agua dulce se encuentran en mayor o menor medida en riesgo de colapso (Janssen *et al.*, 2016), a lo que habría que añadir el 19% de los ecosistemas marinos (Gubbay *et al.*, 2016).

Debido a la necesidad de recuperar estas áreas surge la restauración de espacios degradados, una de las mejores soluciones actuales para combatir el comienzo de la llamada sexta extinción masiva. Dicha disciplina consiste en “el proceso de ayudar a la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido” (Gann *et al.*, 2016), aunque en sus inicios ha tenido un carácter más generalizado, aplicando técnicas poco específicas para distintos escenarios, utilizando soluciones inmediatas para recubrir la zona con una matriz verde muy forzada y en la mayoría de los casos ineficiente (García y Travieso, 2014), sin tener en cuenta los mecanismos ecológicos bloqueados sobre el terreno y sin un diagnóstico inicial exhaustivo.

Afortunadamente, en los últimos años ha cobrado fuerza una nueva manera de hacer las cosas, la restauración ecológica, donde los protagonistas son aquellos mecanismos ecológicos de colonización y reconfiguración del ecosistema que se encuentran bloqueados cuando este ha sido degradado.

Taludes de infraestructura lineal

Dentro de los espacios degradados encontramos varios tipos: espacios sobreexplotados, agotados, afectados por obras de grandes infraestructuras, históricos abandonados, afectados por su ordenación y transformación y afectados por contaminación (Gómez, 2004).

En este estudio trabajamos sobre espacios afectados por obras de grandes infraestructuras, y en concreto, espacios alterados por infraestructuras de transporte como lo son los taludes generados por la construcción de infraestructuras lineales. Este tipo de espacios se refieren a lugares que han sido transformados, directa o indirectamente, a causa de las obras en infraestructuras lineales. Esto implica que no solo el entorno alrededor del trazado de estas infraestructuras se ve afectado sino que además el movimiento (extracción y depósito) y fabricación de materiales alteran otros espacios no tan próximos al trazado de la vía de transporte, carreteras en nuestro caso (Gómez, 2004; Valladares *et al.*, 2011).

Dentro de todas las alteraciones que generan este tipo de obras (eliminación de vegetación, movimientos de tierra, etc.), la génesis de taludes de carretera muy pronunciados y sin ningún tipo de perfil edáfico es en la que se centran los esfuerzos de restauración de este estudio.

La problemática asociada a la restauración de este tipo de elementos deriva de sus particulares características. Estos elementos suelen presentar fuertes pendientes, lo que conlleva una erosión significativa causada por la lluvia y el agua de escorrentía, dificultando el establecimiento de nuevos propágulos o semillas. Además, debido a los movimientos de tierra producidos para crearlos, estos taludes suelen tener un perfil edáfico muy alterado, estar desnudos, sin materia orgánica ni propágulos de vegetación, lo que resulta en la pérdida constante de nutrientes y exposición a la insolación (Gómez, 2004; Magdaleno, 2011; Valladares *et al.*, 2011).

La composición del sustrato, principalmente compuesto por arena y limo, influye en sus propiedades físicas, las cuales cambian según su contenido hídrico. En estado seco, se compacta intensamente, comportándose como una roca sólida, mientras que en estado húmedo se vuelve blando y es fácilmente arrastrado por el agua, además de ser asfixiante debido a la falta de oxígeno (Gómez, 2004). Estas características provocan una considerable pérdida de sustrato y nutrientes, lo cual dificulta enormemente la colonización por parte de la vegetación. Además, la presencia de cantos rodados en la matriz del sustrato, que suelen permanecer en el talud durante la erosión, crea un escudo superficial que obstaculiza aún más cualquier intento de colonización de la vegetación. Por último, la ubicación de estos elementos cerca de carreteras se convierte en un riesgo para los usuarios de las mismas, obligando a un costoso y

continuado mantenimiento, además de aportar contaminación al medio natural que se encuentra en los alrededores (Valladares *et al.*, 2011).

Todo esto plantea una serie de importantes retos que deben ser comprendidos y abordados mediante la implementación de diversas técnicas para lograr una restauración ecológica exitosa del área en cuestión.

Conocidas las condiciones del elemento a restaurar, un aspecto muy importante es, el establecimiento de la vegetación, ya que restaurando la cubierta vegetal conseguiremos numerosos beneficios significativos. Para ello, lo más extendido es el cultivo directo de gramíneas o plantas anuales aunque no suelen establecerse a largo plazo al ser plantas anuales. Esto se debe a que cuando se lleva a cabo existen muchos factores y acciones a realizar que no se tienen completamente en cuenta o se desarrollan de forma incorrecta como por ejemplo la elección de las especies de flora, la preparación previa del perfil edáfico, etc (Gómez, 2004).

Establecimiento de la vegetación

La inclusión de la vegetación es una parte crucial en la mayoría de los proyectos de restauración. En este estudio se apostó por otro enfoque quizá más propio de la corriente de la restauración ecológica. Dicho enfoque consistió en la inclusión de la costra biológica, es decir, la asociación entre las partículas del suelo y diferentes organismos fotoautótrofos y heterótrofos, que viven dentro o encima de los primeros milímetros de suelo. Las partículas del suelo se agregan a través de la presencia y la actividad de esta biota, a menudo extremadamente tolerante, que se seca regularmente, la costra biológica resultante cubre la superficie del suelo como una capa coherente (Weber, 2022).

El motivo de esta elección alternativa a las gramíneas se debe a que se ha observado la ausencia de micorrizas en el sistema radicular de alguna de las pocas gramíneas encontradas en el talud y dado que estas micorrizas son cruciales para el establecimiento duradero de las plantas y el sustrato del talud es un suelo tan empobrecimiento hace que, tal y como se ha observado, durante más de veinte años, estas hayan sido incapaces de colonizar el talud de forma eficaz. Debido a esto, se optó por estudiar la facilitación de la colonización por parte de alguno de los integrantes de la costra biológica, musgos en este trabajo ya que son los predominantes en la zona de estudio.

Además, las características ecológicas y los servicios ecosistémicos que brindan los organismos principales de la costra biológica (Chiquoine, 2016; Bao *et al.*, 2019; Muñoz-Rojas

et al., 2021), en concreto los musgos, ayudan a paliar y revertir las principales problemáticas del área de estudio.

Briofitos

Los briofitos son un grupo de plantas no vasculares pertenecientes al Filo Bryophyta, el cual a su vez pertenece al Reino Plantae y al clado Embryophyta de las plantas terrestres. Se trata de organismos de pequeño tamaño, ya que suelen medir pocos centímetros de longitud, que crecen sobre los primeros milímetros de suelo, sobre piedras o sobre árboles y aunque a menudo se los encuentra en ambientes húmedos y sombreados, los musgos pueden colonizar una gran variedad de hábitats, desde bosques hasta desiertos y montañas.

Su ciclo biológico está compuesto por dos generaciones, siendo este haplo-diplofásico heteromorfo con gametofito dominante.

El gametofito (n), constituye la parte perenne del musgo y a su vez la de mayor tamaño. Está formado por:

- Rizoides: estructuras filamentosas de fijación al sustrato del briofito, con función y aspecto similar a las raíces de las plantas vasculares aunque no participan en la absorción de agua ni nutrientes.
- Caulidio: estructura de soporte del gametofito que también dirige el crecimiento de este ya que sobre él se asientan los filidios y gametangios.
- Filidios: estructuras fotosintéticas con aspecto de hojas cuya función es la de absorción de agua, nutrientes y gases, a veces poseen un nervio rígido en el medio que les da soporte.
- Gametangios: estructuras de reproducción sexual en las que se encuentran los gametos masculinos o femeninos.

El gametofito se forma a partir de esporas que al germinar, producen unos filamentos gelatinosos llamados protonema que más tarde se convertirán en el gametofito.

El gametofito se puede desarrollar de varias maneras:

- Acrocárpico: el individuo posee un único eje, el caulidio no se ramifica y el esporofito se desarrolla sobre el extremo superior del gametofito. Crecen completamente erguidos.
- Pleurocárpico: el caulidio sí es capaz de ramificarse con lo que suelen ser de mayor tamaño, crecer de forma rastrera y poseer varios esporofitos por individuo, que se desarrollan sobre el gametofito.

Existe otra forma de desarrollo intermedio mucho menos común llamado cladocárpico, donde el gametofito crece erguido, presenta caulidio ramificado y varios esporofitos que se desarrollan en las cimas de los distintos extremos del mismo.

La otra generación es el esporofito (2n), más sencillo y menos duradero que el gametofito. Este se desarrolla a partir de la fecundación de los gametos producidos en los gametangios del gametofito y se encuentra formado por:

- Seta: filamento que hace de soporte de la cápsula.
- Cápsula: estructura en la que se generan y contienen las esporas que darán lugar a un nuevo gametofito.
- Caliptra: cubierta que protege parte de la cápsula y el opérculo.
- Opérculo: estructura que cubre la salida de las esporas de la cápsula.
- Peristoma: membrana formada por varios dientes que recubre el borde interior de la cápsula.

Otra característica importante de la reproducción de los musgos es su gran capacidad de reproducción asexual. Pueden presentar múltiples estructuras de reproducción asexual (yemas axilares, propágulos foliares, etc.), y además son capaces de regenerar individuos completos a partir de fragmentos del gametofito.

En cuanto a su ecología, son uno de los principales grupos biológicos primocolonizadores, responsables de la génesis de suelo ya que son capaces de formar extensas capas y/o cojines sobre las rocas y los primeros milímetros del sustrato. Poseen pequeños rizoides que les permiten anclarse a diversas superficies y adaptaciones a la falta de nutrientes, como la absorción de estos a través de toda la superficie del musgo mediante intercambio de cationes muy eficiente y la asociación con cianobacterias y otros microorganismos fijadores de nitrógeno atmosférico (Pope, 2016).

Además, a pesar de ser organismos con una gran demanda hídrica, han desarrollado múltiples estrategias y mecanismos para retener y almacenar gran cantidad de agua, lo que hace que con un aporte de agua mínimo, sumado a su capacidad de criptobiosis, es decir, estado de un organismo cuando su actividad metabólica se vuelve apenas medible o se detiene de forma reversible (Clegg, 2001), puedan resistir largos periodos de sequía (Delgado-Baquerizo *et al.*, 2016; Pope, 2016).

Y por último, en cuanto a sus interacciones faunísticas, aportan refugio y hábitat a gran variedad de organismos desde diversas especies de artrópodos (Sushko, 2019) hasta tardígrados. Además, se sabe que el musgo es un material recurrente en la fabricación de nidos (Deeming y Mainwaring, 2015) y camas de micromamíferos. Todo esto le aporta gran valor

ecológico, no solo desde el punto de vista de la revegetación sino también desde la recuperación de hábitats para la fauna.

Este conjunto de características, estrategias y mecanismos hace de los musgos un poderoso aliado a tener en cuenta en el contexto de la restauración ecológica, ya que como muestran diversos estudios, la costra biológica ayuda a mitigar y resolver problemáticas recurrentes en la restauración, especialmente de áreas semi-áridas y degradadas (Delgado-Baquerizo *et al.*, 2016). Entre estas acciones beneficiosas encontramos: mejorar la calidad del suelo tanto regenerando las comunidades de microorganismos del suelo (Antoninka *et al.*, 2015), como sus propiedades físicas y químicas; aportar protección frente a las alteraciones, sobre todo contra la erosión tanto por el agua de escorrentía como por el viento (Bu *et al.*, 2015; Bao *et al.*, 2019; Juan *et al.*, 2023).

Por todo ello los briófitos constituyen, y más en nuestro caso particular, un grupo perfecto para ser tenido en cuenta en situaciones de restauración ecológica. Todo ello, sumado a la poca atención tanto científica como social que se da a los musgos, ha impulsado la realización de este trabajo, desarrollado en una zona degradada asociada a una infraestructura lineal.

Objetivos

El objetivo general de este estudio consistió en investigar la viabilidad de los musgos para su inclusión en situaciones de restauración ecológica de taludes de carretera, en nuestro caso concreto, en un talud situado a las afueras de la ciudad de León. Para lograr este objetivo se establecieron tres subobjetivos:

- Conocer la diversidad de briófitos del área de estudio.
- Estudiar la problemática que afecta al área de estudio produciendo su degradación.
- Analizar el desarrollo de los briófitos en zonas degradadas y taludes para su aplicación en restauración ecológica.

Zona de estudio

El área de estudio sobre la que se ha trabajado se corresponde con unos taludes de la carretera LE-5521 en el término municipal de Santovenia de la Valdoncina, León (42°33'28.2"N 5°38'04.2"W) (Figura 1).

Estos taludes se han formado por retirada de materiales para la construcción de carreteras, por lo que se clasifican como desmontes (Valladares *et al.*, 2011). Poseen un sustrato compuesto de una matriz arcillosa de arena y limos junto con cantos rodados de gran tamaño, sustrato característico de fondo de valle (Suárez-Rodríguez *et al.*, 2005). La pendiente media de los mismos es aproximadamente de 34°.



Figura 1. Fotografía satélite de la localización del área de estudio junto con su situación respecto a la península Ibérica.

Las problemáticas principales que han estado impidiendo la regeneración natural de la zona durante más de veinte años se han observado tanto durante las múltiples visitas al área de estudio como durante el cultivo experimental de costra biológica y el análisis químico del sustrato. Estas son:

- Erosión del sustrato a causa del agua de escorrentía: Esta problemática se encontró tanto en la zona de estudio como en el cultivo experimental. En la zona de estudio se observó que existen canales de escorrentía sobre diversas partes de los taludes (Figura 2) además de sustrato arrastrado a la carretera y camino adyacentes. También se observaron estos síntomas en el cultivo experimental concretamente sobre el tratamiento de inclinación de las bandejas en las cuales al realizar el riego se observó que parte del sustrato se desprende y termina siendo depositado en la base de las bandejas. Este fenómeno es una de las grandes problemáticas en restauración y está ampliamente documentado por diversos autores (Bu *et al.*, 2015; Bao *et al.*, 2019; Juan *et al.*, 2023).



Figura 2. Fotografías de los taludes de carretera que corresponden a la zona de estudio. (1) Foto general del talud (2) detalle que muestra los efectos del agua de escorrentía.

- Propiedades físicas y químicas del suelo: esta problemática también se observó en las distintas fases del estudio. Tanto en campo al ir a recoger el sustrato compactado como en el cultivo al ir observando la hidrología de este. La matriz de nuestro sustrato posee partículas tan pequeñas que observamos que absorbía una gran cantidad de agua sin dejar espacio suficiente para el aire convirtiéndolo en un suelo asfixiante, tal y como lo mencionan los autores consultados (Gómez 2004, Magdaleno, 2011). Además, al evaporarse este agua el suelo sufría una compactación y cuarteado que también se observa en las bandejas de cultivo, haciendo que mientras estuviera seco, el suelo fuera

mucho menos accesible para la vegetación. En cuanto a las propiedades químicas del suelo, el análisis realizado muestra que el suelo se encuentra bastante empobrecido ya que posee un pH ácido que solo permite una buena disponibilidad de hierro.

En cuanto a la caracterización climática, nos encontramos en un clima mediterráneo oceánico o oceánico de transición, ya que la zona se sitúa entre regiones con climas mediterráneo y oceánico típicos. La temperatura media es de 11 °C, la media de las máximas es de 16,35 °C, la media de las mínimas es de 5,9 °C y la precipitación media anual es de 559 mm (Figura 3).

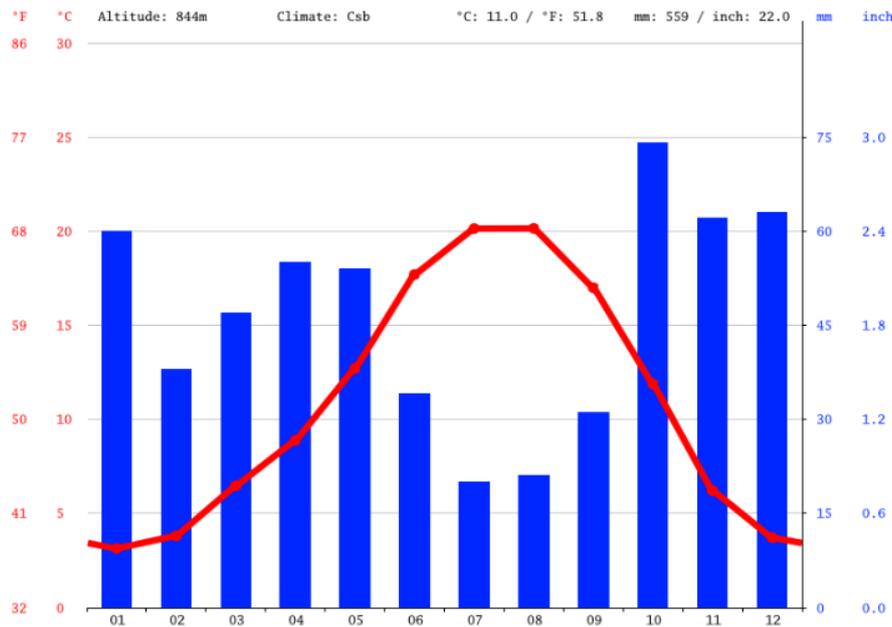


Figura 3. Climograma de la ciudad de León. Fuente: (Climate-data.org)

La vegetación dominante en la zona se corresponde con un matorral de degradación compuesto por escobas, tomillos, etc. Además, existen algunos robles y otros árboles dispersos que constituyen los vestigios de la vegetación dominante anterior en la zona antes de su degradación. Como se aprecia en las fotografías (Figura 2) el talud se encuentra débilmente colonizado por gramíneas y el matorral mencionado anteriormente.

Material y métodos

Recolección e identificación de las especies de la zona de estudio

El primer paso consistió en la recolección e identificación de la flora briofítica existente alrededor de la zona de estudio. Para ello, se realizó un muestreo aleatorio de las mismas

durante las visitas al área de estudio llevadas a cabo para conocer y caracterizar en profundidad la zona, junto con sus problemáticas asociadas. Con ello evitamos la utilización de especies alóctonas en la zona y seleccionamos las especies y ecotipos mejor adaptados a las condiciones ambientales presentes (composición del suelo, climatología, ecosistema, etc).

Para la observación e identificación de las muestras se trabajó con material de laboratorio básico como lupas, microscopio, pinzas, portaobjetos, cubreobjetos y bisturí. También se utilizaron diversas claves y guías de campo de briofitos para el estudio y determinación de las especies recolectadas (Collado y Fernández, 2003; Casas *et al.*, 2006; Pope, 2016; Hugonnot *et al.*, 2017; Sociedad Española de Briología, 2007-2020). Además para el análisis de las aptitudes favorables se siguieron las indicaciones de Rosentreter (2020).

Posteriormente se realizó un análisis de las especies encontradas para saber cuáles son las que poseen las aptitudes más favorables para ser utilizadas en proyectos de restauración y realizar la elección de las especies con las que trabajaríamos. Se redujo a dos el número de especies utilizadas para el cultivo para facilitar tanto el desarrollo de las mismas como para facilitar la recogida y estudio.

Preparación y cultivo del material

Después de la selección de las especies, se recogió material suficiente de las mismas para su posterior cultivo y se procedió a la preparación del mismo.

- Limpieza y secado del material briofítico

El material briofítico recogido se lavó y filtró varias veces para separarlo del sedimento y limpiar las impurezas que pudiera presentar, después dicho material se dejó secar a temperatura ambiente. Para ello se utilizaron una serie de tamices y bandejas, además de una desecadora. Posteriormente, el material seco se pesó. En total se recogieron 50 gr de peso seco de gametofito de ambas especies junto con esporofitos.

-Preparación de la solución nutritiva

Para impulsar el desarrollo del cultivo, se utilizó una solución nutritiva, concretamente la solución Knop enriquecida con micronutrientes (Tabla 1). Dicha solución se diluyó en

proporción 1/5 junto con agua destilada. (Sahu y Asthana, 2013; Sahu *et al.*, 2017; Bu *et al.*, 2018; Heck *et al.*, 2021).

Tabla 1. Concentración de los nutrientes de la solución nutritiva Knop.

Compuesto	Concentración
dihidrógeno fosfato de potasio	2 mM
cloruro de potasio	3 mM
sulfato de magnesio	1 mM
nitrate de calcio	4 mM
sulfato de hierro (II)	45 μ M
ácido bórico	50 μ M
sulfato de manganeso	50 μ M
sulfato de zinc	15 μ M
yoduro de potasio	2.5 μ M
molibdato de sodio	500 nM
sulfato de cobre	50 nM
nitrate de cobalto (II)	50 nM

- Triturado y homogeneizado junto con la solución nutritiva

El material se mezcló y trituró junto con solución nutritiva Knop enriquecida, mediante el uso de una batidora. Con este triturado se consigue multiplicar las unidades de material colonizador además de estimular el crecimiento.

- Cultivo y mantenimiento

El cultivo de material se realizó mediante el método de hidrosiembra. Se utilizó una botella de plástico de 1,5 L a la que se le perforó el tapón, de modo que al apretar esta se disparaba el material briofítico junto con la solución nutritiva consiguiendo introducir el mismo en los primeros milímetros de suelo.

Para el mantenimiento de dicho cultivo se regó de forma alternante con agua destilada y la solución nutritiva ya mencionada. En cuanto a la intensidad del riego se hizo de forma que se mantuviera una humedad constante en el sustrato, de modo que se perdiera el menor contenido hídrico.

Diseño experimental

Para el diseño experimental, el cultivo se realizó sobre sustrato recogido de la zona de estudio. Este cultivo estaba compuesto por 6 bandejas de 53x38 cm, ocupando un total de 1,21 m² de

superficie de cultivo, dentro de las cuales existían 3 réplicas con 30° de inclinación como tratamiento y las otras 3 eran réplicas del control con 0° de inclinación (Figura 4). Además, a todas estas bandejas se les instaló un tejado abierto a modo de cubierta para controlar parcialmente el contenido hídrico del suelo y la insolación (Bu *et al.*, 2018).

Para la preparación del sustrato se extrajo sustrato compactado de la zona de estudio manualmente y se distribuyó de manera homogénea creando una capa de sustrato de unos 6 cm de grosor.



Figura 4. Fotografía de las bandejas en las que se realizó el cultivo experimental.

- Diseño de muestreo y muestreo fotográfico del cultivo

Para el diseño de muestreo se optó por un muestreo sistemáticamente centrado de 6 unidades de muestreo de 5 cm² por bandeja, señalizadas mediante palillos, quedando distribuidas como se observa a continuación (Figura 5).

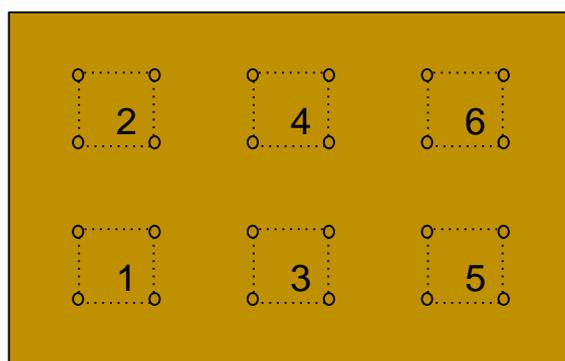


Figura 5. Esquema del diseño de muestreo en cada una de las bandejas de cultivo.

Para el muestreo de los datos se optó por la toma de fotografías de todas las unidades de muestreo cada 15 días durante los 3 meses del cultivo, empezando esta una vez la cobertura del cultivo fuera apreciable. La monitorización del cultivo se comenzó a realizar a partir de los 30 días de cultivo. A partir de esa fecha, cada 15 días aproximadamente, se realizó un seguimiento fotográfico de la evolución del cultivo de todas las parcelas, siendo así los tiempos de muestreo: T1 a los 45 días del inicio del cultivo, T2 a los 60 días, T3 a los 75 días, T4 a los 90 días, T5 a los 105 días y T6 a los 120 días (Figura A. 1). El cultivo se realizó entre los meses de noviembre de 2022 y marzo de 2023.

Análisis de datos

- Análisis fotográfico

El análisis de las fotografías se realizó mediante el editor fotográfico Adobe Photoshop v.23 (Adobe systems, 2021). En este análisis se cuantificó la cobertura total del cultivo de costra biológica en porcentaje, mayoritariamente musgos; y cuando la cobertura de estos era superior al 20% se cuantificó el porcentaje de esta cobertura que se correspondía a tres intervalos de intensidad de color. El procedimiento llevado a cabo para este análisis fue:

1º: Se recortó la imagen hasta dejar sólo los límites del área de 5 cm² delimitada por los palillos con la herramienta de recorte.

2º: Se estableció una escala personalizada para la foto, transformando los píxeles en centímetros cuadrados.

3º: Con la herramienta de grabar medidas se seleccionó el área total de la imagen y se calculó el área total de la foto.

4º: Se seleccionó una gama de colores correspondiente a todos los tonos de verde existentes en la fotografía con la herramienta de selección, la opción de gama de colores y muestreando una selección personalizada de colores. Además, para la selección de esta gama de colores muestreados se aplicó una tolerancia del 30%.

5º: Con la herramienta de grabar medidas se calculó el área correspondiente a la selección.

6º: Con estas dos medidas se calculó el porcentaje del área total cubierta por el color verde y por tanto por el cultivo de costra biológica.

7º: Si este resultado era mayor al 20%, se procedía al cálculo de la cobertura de cada rango de verde dentro de la gama total por medio de la herramienta de gama de colores y la opción tonos medios. Esta herramienta transforma la selección de colores en una escala de grises con valores de intensidad desde el 0 (Valor más oscuro, negro absoluto) hasta el 255 (valor más claro, blanco absoluto). Además, para la selección de estos tonos se aplicó una tolerancia del 30%.

8º: A continuación, se seleccionaron tres rangos dentro de estos valores que fueran los más representativos del cultivo: rango de tonos claros (20-70), rango de tonos medios (70-120), rango de tonos oscuros (120-170). Se obviaron los valores por debajo de 20 y por encima de 170 para evitar tonos de verde erróneos o que no resultaran representativos de crecimiento. Para esta selección también se aplicó una tolerancia del 30%.

9º: Por último, por cada rango de tonos seleccionados se repetían los pasos 5º y 6º para calcular el porcentaje de cobertura de cada rango.

- Análisis estadísticos

Después del análisis fotográfico se realizaron distintos análisis estadísticos con los datos recogidos a través de los programas Excel y SPSS.

Con el programa Excel (Microsoft Corporation, 2013) se realizaron las tablas de recogida de datos, las medias aritméticas de los distintos conjuntos de datos y las gráficas que se presentan en este estudio.

Con el programa estadístico IBM SPSS Statistic 26 (IBM Corporation, 2022), se realizaron los análisis estadísticos. Para comprobar que los datos utilizados seguían una distribución normal se realizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov (intervalo de confianza del 95%). Para el análisis de los datos de cobertura e intensidad, hemos realizado un análisis de varianza (ANOVA de un factor), para poner de manifiesto las diferencias entre los tiempos e inclinaciones de cada tratamiento, para lo que hemos aplicado el test de Tukey y un intervalo de confianza del 95%.

-Análisis de suelo

Para el análisis de los nutrientes y pH del suelo, realizado en el laboratorio de técnicas instrumentales de la Universidad de León, el procedimiento seguido por el laboratorio fue:

- Acondicionamiento: Secado al aire hasta peso constante. Se ha pasado por un tamiz de 2 mm de luz. Para las determinaciones de N y materia orgánica se ha molido una porción de suelo con molino de bolas, obteniendo un tamaño de partícula menor.
- pH en agua: en una suspensión suelo/agua en una relación 1:2,5 y posterior lectura mediante método potenciométrico, utilizando un pH-metro.
- Materia orgánica (%): método Walkley-Black.
- Nitrógeno total (%): método Kjeldahl.
- Fósforo asimilable: método Olsen. Extracción mediante NaHCO₃ 0,5 M pH 8,5 y lectura mediante espectrometría molecular utilizando un espectrofotómetro uv/vis.
- Cationes (calcio, magnesio, sodio y potasio): extracción AcONH₄ 1N pH 7 y posterior lectura mediante ICP-OES.
- Oligoelementos (hierro, manganeso, cinc y cobre): extraído con DTPA pH 7,3 y posterior lectura mediante ICP-OES.
- Boro: extracción mediante agua caliente y determinación mediante ICP-OES.

Resultados

Diversidad briofítica

Los resultados del muestreo y análisis de la diversidad de especies briofitas en la zona de estudio muestran que se encontraron un total de 8 especies briofitas terrícolas, ya que las especies epifitas o saxícolas no fueron estudiadas al no poder ser cultivadas sobre el sustrato del talud. La mayoría de estas especies fueron encontradas y recolectadas a los pies de los taludes estudiados, en la cima de los mismos o en los alrededores de la zona de estudio.

Las especies encontradas y su clasificación actual (Bánki *et al.*, 2023) indicando los táxones en los que están clasificados:

Reino Plantae

División Bryophyta

Clase Polytrichopsida

Orden Polytrichales

Familia Polytrichaceae

Género *Polytrichum*

Especie *Polytrichum piliferum* Hedw.

Clase Bryopsida

Orden Hypnales

Familia Brachytheciaceae

Género *Brachythecium* Schimp.

Familia Hypnaceae

Género *Hypnum*

Especie *Hypnum cupressiforme* var *lacunosum*

Brid.

Orden Splachnales

Familia Bryaceae

Género *Bryum*

Especie *Bryum argenteum* Hedw.

Especie *Bryum capillare* Hedw.

Orden Dicranales

Familia Ditrichaceae

Género *Ceratodon*

Especie *Ceratodon purpureus* subsp *purpureus* (Hedw.)

Brid.

Orden Pottiales

Familia Pottiaceae

Género *Didymodon*

Género *Syntrichia*

Especie *Syntrichia ruralis* (Hedw.) F. Weber &

D. Mohr

-*Brachythecium* sp.: musgo pleurocárpico de tamaño mediano, alcanzando aproximadamente 5 cm de altura. Sus caulidios son postrados o ascendentes, y sus filidios son lanceolados, ligeramente plegados longitudinalmente, planos y rectos. Presenta células medias lineales y células alares cuadradas o rectangulares. El ápice de los filidios es agudo y apiculado, mientras que el nervio es simple y se extiende más de la mitad del filidio. En el ápice, el margen es

finamente denticulado. La cápsula es piriforme alargada y péndula, y su peristoma es simple. Esta especie forma tapices. Estas características se observan en la Figura 6.

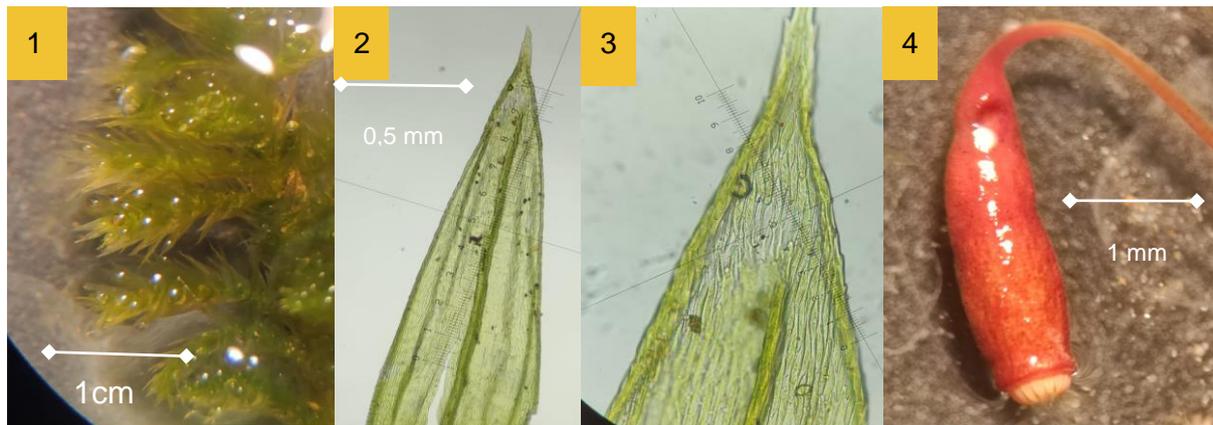


Figura 6. Fotografías de *Brachytecium* sp. (1) Hábito en húmedo, ramificaciones del caulidio principal (2) Filidio visto al microscopio óptico (10X) (3) detalle de células medias y ápice del filidio visto al microscopio (40X)(4).

-*Bryum argenteum* var. *lanatum*: musgo acrocárpico de pequeño tamaño, alcanzando aproximadamente 2 cm de altura. Tiene un caulidio juláceo y filidios con un brillo plateado en estado seco. Los filidios son muy ovalados, cóncavos y presentan una punta hialina. El margen es plano y entero, con un ápice acuminado. Las células medias son romboidales, mientras que las células basales son rectangulares o cuadradas. El nervio es corto y normalmente se extiende solo hasta las tres cuartas partes del filidio. La cápsula es exerta y pendiente, de forma elipsoide a piriforme, con un opérculo mamilar y peristoma simple. Esta especie forma mechones o amplios céspedes y se reproduce principalmente de forma asexual, a través de bulbos axilares. Es muy adaptable y se encuentra comúnmente en una amplia variedad de hábitats y sustratos, lo que la convierte en una opción popular para la restauración ecológica. Estas características se observan en la Figura 7.



Figura 7. Fotografías de *Bryum argenteum* (1) Hábito en húmedo foto del cultivo realizado en el presente estudio (2) Filidio visto al microscopio óptico (10X) (3) Esporofito, arriba, cápsula con opérculo, abajo, cápsula abierta con peristoma simple.

-*Bryum capillare*: musgo acrocárpico de tamaño pequeño, alcanzando alrededor de 2 cm de altura. Tiene un caulidio erecto y los filidios se enrollan en espiral sobre el caulidio en estado seco. Los filidios son ovado-espátulados, con un ápice abruptamente rematado en punta pilífera. Presenta pelos hialinos cortos. Las células medias son romboidales, mientras que las células basales son rectangulares o cuadradas. El margen está compuesto por células alargadas, uniestratificado, y el nervio se extiende más allá del ápice. La cápsula es exerta, piriforme alargada, inclinada a péndula, con un peristoma simple y endostoma. Esta especie es frecuente y muestra una gran plasticidad ecológica, ya que se encuentra en una amplia variedad de hábitats, como paredes de roca, suelos de bosque y áreas urbanas. Estas características se observan en la Figura 8.

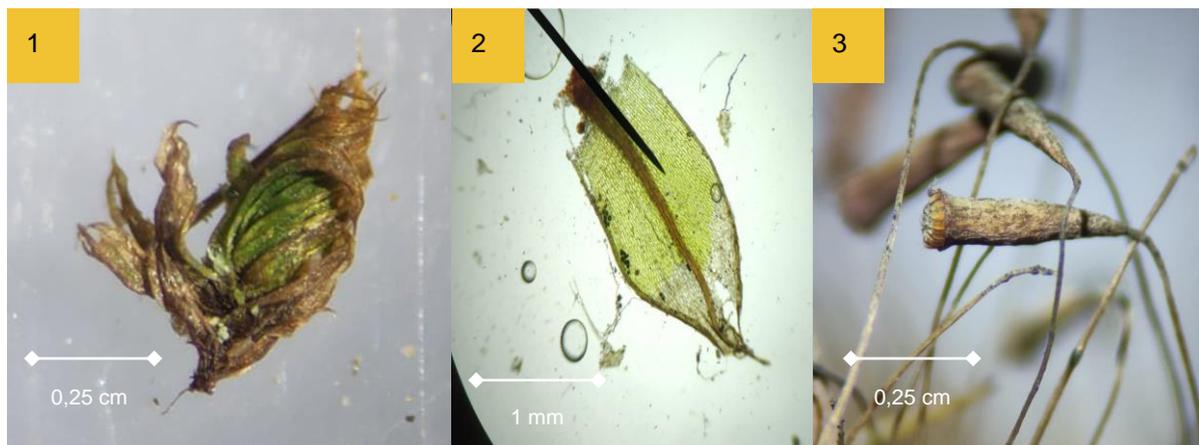


Figura 8. Fotografías de *Bryum capillare* (1) Hábito en seco (2) Filidio visto al microscopio óptico (10X) (3) Esporofito, cápsula abierta con peristoma simple.

-*Ceratodon purpureus* subsp. *purpureus*: musgo acrocárpico de tamaño pequeño, con aproximadamente 2 cm de altura. Sus filidios son erecto patentes, de forma ovalolancelada, con un ápice ligeramente denticulado. Los márgenes son recurvados y uniestratificados. Las células medias son más o menos cuadradas y lisas, mientras que las células basales son rectangulares. El nervio es grueso, generalmente percurrente, aunque a veces es excurrente. La cápsula es muy característica, dehiscente, exerta y cilíndrica, con una posición horizontal o inclinada. El peristoma es simple y está bien desarrollado, de color marrón rojizo, con 16 dientes papilosos divididos hasta la base (32). La seta es de color púrpura, recta y ligeramente retorcida cuando está seca. Esta especie es muy abundante, cosmopolita y ampliamente extendida, formando céspedes densos de color verde o rojizo sobre suelos expuestos, con cápsulas abundantes. Estas características se observan en la Figura 9.



Figura 9. Fotografías de *Ceratodon purpureus* subsp. *purpureus* (1) Hábito en seco (2) Filidio visto al microscopio óptico (10X) (3) Esporofito, arriba, cápsula con opérculo, abajo, cápsula abierta con peristoma simple(4) detalle del peristoma característico de *Ceratodon* visto al microscopio óptico (40X).

-*Didymodon* sp.: musgo acrocárpico de pequeño tamaño, variando entre 0,5 y 2 cm de altura. Sus filidios son ovalolanceolados y monoestratificados. En estado húmedo, los filidios son erectos patentes, mientras que en estado seco se vuelven imbricados. Las células medias son isodiamétricas y lisas, mientras que las células basales son cuadrado-rectangulares. El margen es recurvado y entero, y el nervio es grueso y percurrente. Este musgo forma cojines pequeños en lugares expuestos en el suelo. Estas características se observan en la Figura 10.

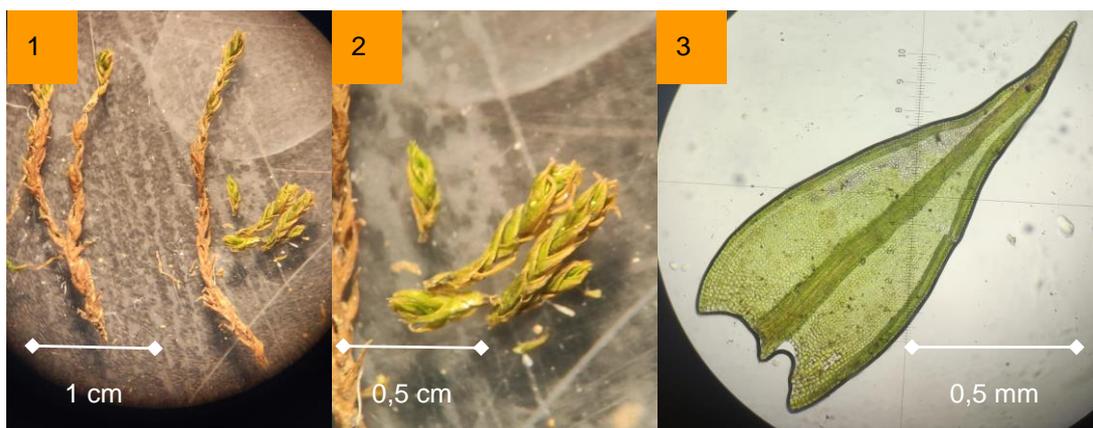


Figura 10. Fotografías de *Didymodon* sp. (1) Hábito en seco (2) Caulidio visto más en detalle (3) filidio visto al microscopio óptico (10X).

-*Hypnum cupressiforme* var. *lacunosum*: musgo pleurocárpico de gran tamaño, alcanzando aproximadamente 7 cm de altura. Sus células son lisas y elongadas. Los filidios son erectos y se estrechan gradualmente hacia una punta corta. El margen es entero y presenta numerosas células alares diferenciadas, sin nervio. Este musgo forma tapices densos. Estas características se observan en la Figura 11.

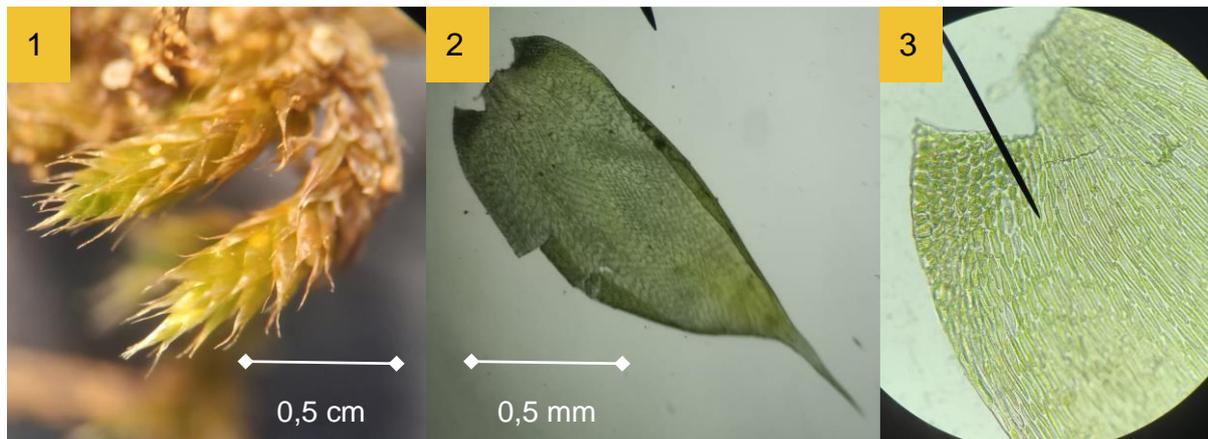


Figura 11. Fotografías de *Hypnum cupressiforme* var. *lacunosum* (1) Hábito en seco, ramificaciones del caulidio principal (2) Filidio visto al microscopio óptico (10X) (3) Detalle de células medias y basales del filidio visto al microscopio óptico (40X).

-*Polytrichum piliferum*: musgo acrocárpico de tamaño medio, alcanzando aproximadamente 4 cm de altura. Su caulidio es simple, rígido y desnudo en la parte inferior. Los filidios se extienden en estado húmedo y se imbrican en seco. Son lanceolados, ampliamente incurvados, con margen entero y una arista dentada hialina. En el lado ventral del filidio, se observan numerosas lamelas longitudinales, cónicas y lisas. El esporofito es de color rojo intenso, con una caliptra campanulada que cubre toda la cápsula. La cápsula es corta y angulosa. Este musgo forma cojines laxos en claros, fisuras de roca y lugares expuestos, caracterizados por ser ácidos y secos. Estas características se observan en la Figura 12.

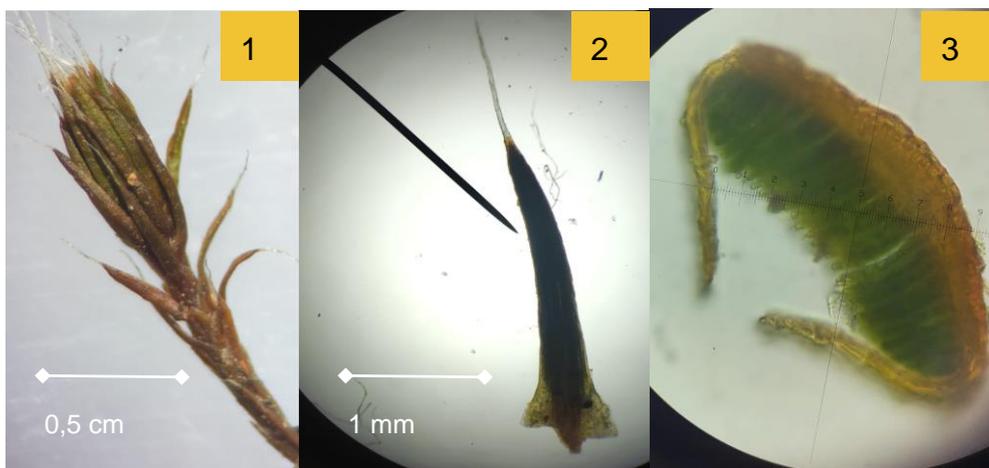


Figura 12. Fotografías de *Polytrichum piliferum* (1) Hábito en seco (2) Filidio visto al microscopio óptico (4X) (3) Detalle de corte transversal del filidio y lamelas longitudinales visto al microscopio óptico (40X).

-*Syntrichia ruralis*: musgo acrocárpico de tamaño medio, con una altura aproximada de 5 cm. Sus filidios son lingüiformes y fuertemente recurvados. Las células medias son isodiamétricas

y papilosas, mientras que las células basales son rectangulares. El margen de los filidios es entero, y presenta largos pelos hialinos dentados. El nervio es rígido y estrecho. La cápsula es cilíndrica, y el peristoma está compuesto por 32 dientes retorcidos. La seta se retuerce en seco. *Syntrichia ruralis* forma cojines pardo rojizos laxos en fisuras de roca y en la base de árboles. Estas características se observan en la Figura 13.



Figura 13. Fotografías de *Syntrichia ruralis* (1) Hábito húmedo (2) Filidio visto al microscopio óptico (4X) (3) Detalle del pelo hialino dentado del filidio al microscopio óptico (10X) (4) Corte transversal del filidio al microscopio óptico (10X) (5) Cápsula abierta con peristoma simple retorcido formando un tubo.

Después de este análisis se concluyó que, de las especies recolectadas, las que presentaban mejores características colonizadoras eran *Bryum argenteum* y *Ceratodon purpureus* subsp. *purpureus*.

- *Bryum argenteum*: destaca por su gran capacidad de reproducción asexual dado que posee yemas axilares, esporas y gemas rizoidales y protonemales.

- *Ceratodon purpureus* subsp. *purpureus*: presenta una alta producción de esporofitos y esporas de fácil germinación y posee cierta capacidad de reproducción asexual.

Desarrollo del cultivo

En la gráfica de la figura 14, se pueden ver los datos de la cobertura media del cultivo frente al tiempo, los valores máximos, 44,33 %, se alcanzan en T4, mientras que los mínimos, 9,83, se encuentran en T2. Respecto al análisis ANOVA realizado se observaron diferencias significativas entre la cobertura de los tiempos T3 y T4 y el resto de los tiempos analizados, además se observa claramente que los datos de T1 a T3 siguen una tendencia positiva al crecimiento y sin embargo a partir de T4 existe una disminución en la cobertura que se estabiliza entre T5 y T6. Además, observamos que dentro de los distintos subgrupos el que más cobertura posee en la mayoría de las semanas es el que corresponde a la altura baja seguido de

la altura media y el tratamiento horizontal. También vemos que la cobertura máxima alcanzada es de un 44% en T3.

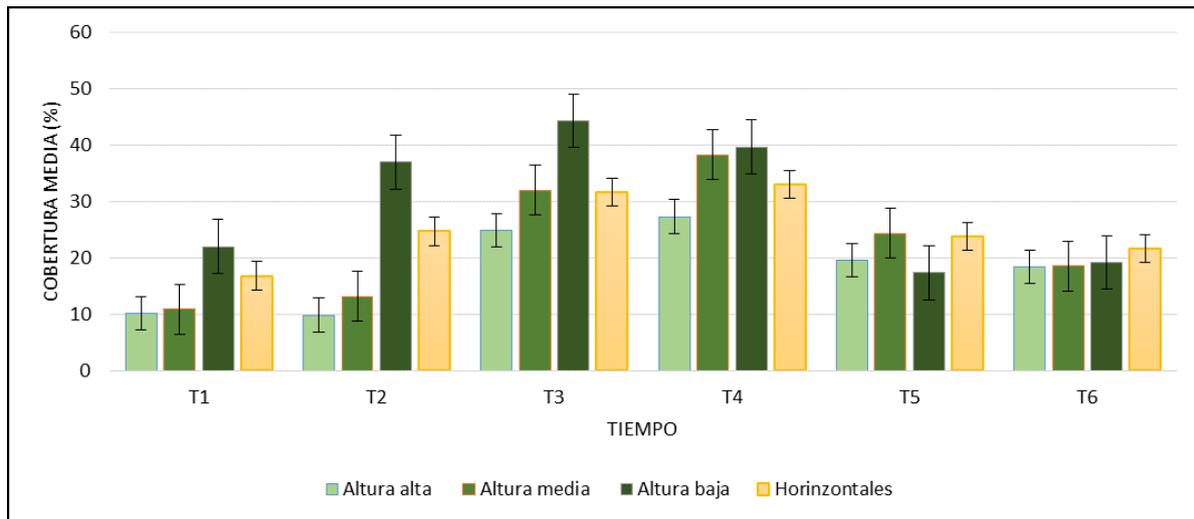


Figura 14. Gráfica que representa la cobertura media del cultivo de musgo frente al tiempo.

La cobertura conseguida (figura 14) hasta T3, nos muestra unos datos muy positivos de colonización. En ellos vemos una cobertura media del 32% en el conjunto de tratamientos, incluso de un 44% si nos fijamos en las parcelas a altura baja en la pendiente. Esto supone que habiendo utilizado solo unos 50 g de material briofítico hemos cubierto una media de 0,32 m² de los 1,21 m² totales cultivados, lo cual significa que 1 g de cultivo generó de media 8,8 cm² de cobertura en 75 días.

Como podemos observar en la figura 15 se aprecia que el rango de intensidad media del color verde siempre se mantiene en valores cercanos al 50% y se mantiene estable durante todo el experimento, los valores de intensidad baja también se mantienen más o menos estables durante todo el experimento, aunque con datos cercanos al 20%. En cambio, en los valores de intensidad alta en T2 se puede apreciar que existen diferencias significativas con el resto de los tiempos, donde alcanza su valor máximo y casi iguala cobertura con la intensidad media. Esto es la razón por la que, también en el T2 existen diferencias significativas con T1, T3 y T6.

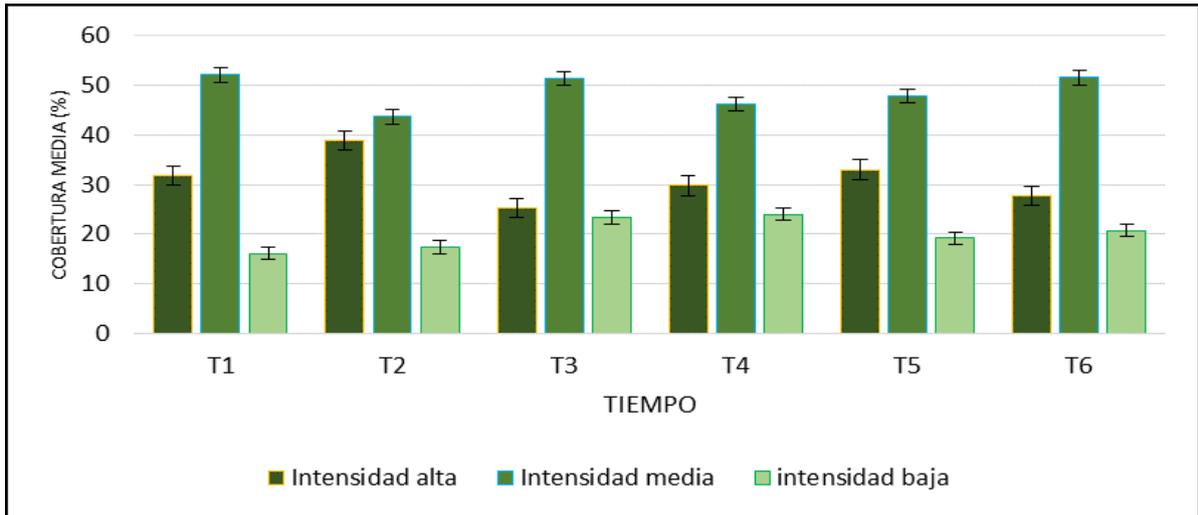


Figura 15. Gráfica que representa la cobertura media del cultivo de musgo según los rangos de intensidad del color (alta, 20-70; media, 70-120; baja 120-170) frente al tiempo.

Por último, como se aprecia en la gráfica de la figura 16 podemos ver como existen grandes cambios entre los distintos tiempos. En T2 y T3 se observan valores de incremento positivo altos, alcanzando valores extremadamente altos en este último mostrando diferencias significativas con el resto de los tiempos (intervalo de confianza del 95%). Sin embargo, en T4 observamos una pérdida de incremento positivo muy significativa que anticipa lo que pasará en tiempos posteriores (intervalo de confianza del 95%). En estos, T5 y T6, se observan valores de incremento negativos, es decir, de pérdida de cobertura.

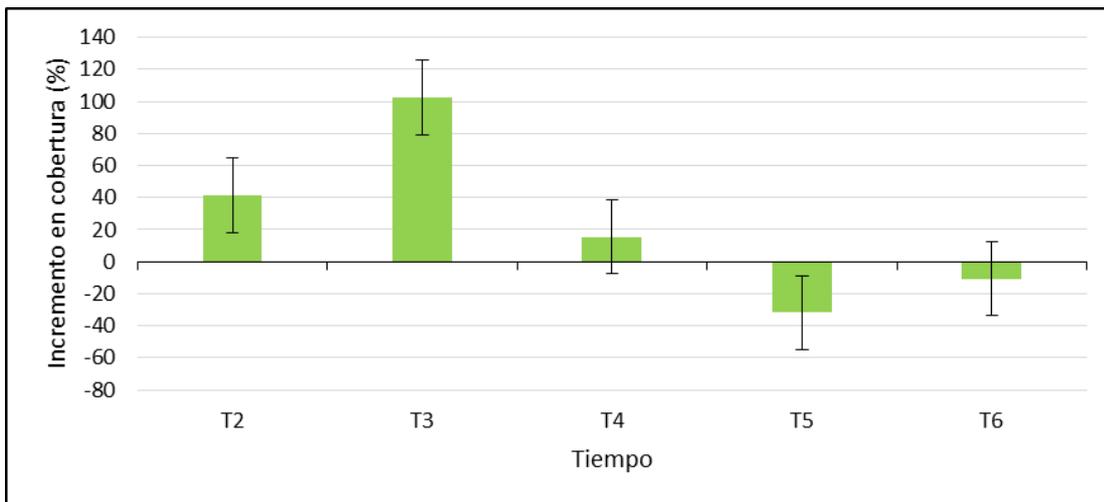


Figura 16. Gráfica que representa el incremento del porcentaje cobertura media respecto al tiempo anterior en función de la inclinación del sustrato frente al tiempo. T1 no se tiene en cuenta en la gráfica ya que en T0 la cobertura es del 0% y tanto el incremento en T1 resulta en un dato sobredimensionado y que daría una impresión errónea.

Análisis de suelo

La tabla 2 muestra los valores del análisis de suelo del suelo que se utilizó en las bandejas de cultivo. Los datos más relevantes encontrados son los de pH ya que nos muestran un pH bastante ácido, el cual es incompatible con la disponibilidad de la mayoría de nutrientes a excepción del hierro. En cuanto al resto de los datos, se observan valores muy bajos que nos indican un suelo bastante empobrecido y vemos que no se observan diferencias significativas entre el sustrato de la bandeja horizontal y la inclinada.

Tabla 2. Datos obtenidos del análisis de suelo. Las unidades de medida de los nutrientes son * partes por millón (ppm); ** centimoles por kilogramo (cmol/kg).

Muestra	pH	M. O.%	N%	P*	Ca**	Mg**	K**	Na**	Mn*	Fe*	Cu*	Zn*	B*
M1 Bandeja inclinada	4,47	0,25	0,05	5,54	1,32	0,58	0,19	0,01	1,61	6,06	0,18	0,32	0,05
M2 Bandeja horizontal	4,74	0,59	0,04	5,54	1,39	0,59	0,2	0,02	1,75	6,38	0,19	0,29	0,05

Discusión

Diversidad briofítica

La diversidad briofítica encontrada tanto en el propio talud como en los alrededores del mismo, 8 especies terrícolas y varias especies saxícolas y epifitas que aunque no fueron consideradas se estaban presentes, se encuentra dentro de valores encontrados en otros estudios similares teniendo en cuenta las diferencias existentes entre las diferentes zonas de estudio (Kubešová y Chytrý, 2005; Concostrina-Zubiri *et al.*, 2019). Esta diversidad tan limitada se justifica debido a que los musgos, como ya se mencionó anteriormente, son sensibles a la contaminación y a la pérdida de agua, dos condicionantes presentes en nuestra zona de estudio.

Pese a ello, observamos que las especies encontradas en nuestra área de estudio son bastante adecuadas para lograr una colonización y restauración del talud eficiente, ya que observando su biología y ecología según los criterios establecidos para analizar el rendimiento de las especies para proyectos de restauración (Rosentreter, 2020). Encontramos que de las 8 especies halladas, *B. argenteum* y *C. purpureus* subsp. *purpureus* poseen un crecimiento rápido y son ampliamente reconocidas como grandes colonizadoras (Rosentreter, 2020), y poseen bastante resistencia frente a condiciones adversas.

De las especies encontradas, *S. ruralis*, *Didymodon sp.* y *P. piliferum* son mencionadas en diversos trabajos (Bu *et al.*, 2018; Rosentreter, 2020) como especies adecuadas tanto para ser cultivadas a gran escala para restauración como para aumentar la biodiversidad rápidamente en lugares en fase de restauración.

Aunque escasas, las especies presentes poseen las características idóneas para, junto con las acciones de restauración adecuadas, lograr una revegetación del talud rápida y eficaz, y con ello una mejora de las propiedades del suelo y el ecosistema.

Cabe recalcar que los pocos ejemplares recolectados en medio de los taludes se encontraban asociados a arbustos o árboles que habían colonizado la pendiente, esto se debe a que la coexistencia de estos cluster de vegetación vascular y la costra biológica es sinérgica ya que la costra biológica mejora el suelo donde crecerá la vegetación vascular y está proporcionará sombra y protección a los organismos de la costra biológica (Rosentreter y Root, 2019).

Costra biológica eficiente y resiliente

Los resultados obtenidos sobre el desarrollo y evolución de nuestro cultivo muestran que la actuación de los musgos ha sido bastante eficiente pese a trabajar con poco material, enfrentar condiciones adversas y tener una calidad de suelo muy baja.

Los datos de desarrollo obtenidos, aunque menores que los observados por otros autores (Bu *et al.*, 2018), resultan prometedores si se tiene en cuenta la diferencia de condiciones climatológicas y que nuestro cultivo se realizó bajo condiciones menos asistidas y se hidrosembró 14 veces menos material briofítico.

Si por otro lado lo comparamos con estudios en los que la costra biológica no fue asistida (*et al.*, 2019) se aprecia una gran mejoría en cuanto a cobertura y desarrollo de la costra biológica. También conviene añadir que estos resultados de cobertura hubieran sido mucho mejores con unas condiciones climáticas más favorables, ya que durante el periodo en el que se llevó a cabo este cultivo (noviembre 2022 - marzo 2023) nos encontramos con el final del invierno y el comienzo de la primavera. Un período que estuvo marcado por unas temperaturas e insolación anormales para la época, así como una disminución de las precipitaciones y de la humedad en el aire considerable. El comienzo de este cambio brusco de las condiciones climáticas coincidió con el intervalo de tiempo entre T4 y T5, y se prolongó hasta el final del experimento. Esto pudo ser la causa de la tendencia negativa a la pérdida de cobertura desde T4 hasta T6, ya que según otros autores (Bu *et al.*, 2018) la tendencia tiene a ser siempre positiva siempre y cuando las condiciones climáticas no cambien bruscamente.

Para evitar esta situación hubiese sido conveniente empezar el cultivo en Septiembre y así aprovechar mucho más las condiciones climáticas favorables del otoño e invierno (Bu *et al.*, 2018).

Sin embargo, la tendencia muy positiva al aumento aún mayor de la cobertura de T2 a T3, hace lógico pensar que esta tendencia se hubiese prolongado en el tiempo logrando resultados de cobertura y desarrollo de la costra biológica mayores.

Además de para observar el potencial del cultivo de costra biológica, este cultivo ha servido para ilustrar aún más las problemáticas del área de estudio y averiguar cómo reacciona la costra biológica frente a los cambios. Prueba de ello son las tendencias y cambios observados en El desarrollo de la cobertura frente al tiempo en función la altura de inclinación, donde se puede observar claramente el efecto que tiene esta última sobre el crecimiento viendo que a mayor altura en terreno inclinado menor cobertura.

Esto se puede deber a que el agua de escorrentía además de erosionar el sustrato, también arrastra parte de los propágulos que generaban la costra biológica disminuyendo la densidad de propágulos en las parcelas que se encontraban más arriba y con ello su desarrollo. Mientras que a medida que este agua desciende por la pendiente su velocidad disminuye, gracias también a la costra biológica ya asentaba (Juan *et al.*, 2023) y va depositando parte de los nutrientes y propágulos arrastrados en parcelas que se encuentran más abajo en la pendiente, provocando un reparto desigual de nutrientes y material briofítico en las parcelas.

Todo esto se traduce en mayor carga de propágulos y mejores condiciones para las parcelas con una altura menor en la pendiente. Lo que se puede observar en los resultados que vemos en la gráfica un crecimiento significativamente mayor en las parcelas a medida que bajamos en la pendiente. Por ello, el tratamiento de altura baja, pese a estar en pendiente posee un mayor crecimiento que el tratamiento horizontal, el cual no posee este aporte extra de propágulos y nutrientes.

Por otro lado estaría el ya mencionado efecto del cambio brusco de las condiciones climáticas hacia un ambiente más seco y soleado. Además, en T6 vemos que esta pérdida se empieza a frenar con respecto a T5, lo cual atendiendo a la ecología de los musgos hace pensar que ante el cambio brusco de las condiciones climáticas estos ya estarían activando las adaptaciones que poseen para resistir a las condiciones adversas como la ya mencionada criptobiosis.

Esto podría estar mostrando la resiliencia de la costra biológica y podría indicar que si las condiciones adversas se hubiesen prolongado, hubiésemos observado un estancamiento del incremento de cobertura (tanto negativo como positivo) para resistir este periodo desafiante y más tarde, cuando las condiciones volviesen a ser favorables habríamos observado una

recuperación y nuevo crecimiento de la costra biológica añadiendo más características a su favor en el contexto de restauración ecológica (Zhang *et al.*, 2017).

Un último resultado interesante lo observamos en la gráfica que muestra el porcentaje de cobertura de cada rango del color verde frente al tiempo y es que podemos observar que en las primeras semanas, especialmente en T2 existen un porcentaje muy alto de cobertura del verde más oscuro.

Esto puede estar relacionado con que el protonema de los musgos, su primera fase de crecimiento; y las cianobacterias (que aunque no fueron sembradas intencionadamente se encontraban presentes en el cultivo) son de estos tonos oscuros de verde. Lo cual estaría relacionando un alto porcentaje de cobertura de este rango con un alto crecimiento de la cobertura o incluso la densidad de la costra biológica.

En relación a los otros dos rangos, no se encontraron diferencias muy reseñables entre los distintos tiempos.

Propuestas interesantes para restauración

Como parte final de este estudio, se proponen una serie de actuaciones que podrían mejorar el estado de degradación en el que se encuentra la zona, junto con el cultivo de costra biológica, en el caso de que se optará por realizar la restauración ecológica del área de estudio tratada o de cualquier otra con características similares.

La razón principal para la aplicación de estas técnicas es, que tal y como muestran distintos autores (Gómez, 2004; Magdaleno, 2011) y atendiendo a las necesidades de los organismos de la costra biológica, generarían una mejora de la eficiencia del cultivo de costra biológica a la vez que se solventarían varias de las problemáticas principales de este tipo de elementos, las cuales se han visto y estudiado en este estudio. Las principales actuaciones propuestas serían:

- Construcción de una cuneta de guardia en la cabecera del talud. Reduciendo la velocidad de agua de escorrentía y aumentando la infiltración de ésta en el sustrato a la vez que evacuamos el exceso de agua de forma más segura.
- Descompactación de las zonas del talud que se encuentren fuertemente compactadas. Con ello haremos que estas zonas sean funcionales ecológicamente, aumentando la superficie a restaurar, ya que serán accesibles para la vegetación colonizadora.
- Realizar un cultivo estratificado de algunos integrantes de la costra biológica. En este estudio se ha observado como el arrastre por el agua de escorrentía y la erosión del

sustrato afectan al desarrollo del cultivo de costra biológica, por ello, para la implantación de dicho cultivo, recomendamos una distribución estratificada del material de cultivo. Esta distribución se realizaría cultivando mayor cantidad de material en las zonas más altas de la pendiente y disminuyendo dicha cantidad a medida que fuera disminuyendo la altura. Con esto, conseguiremos una mayor eficacia del cultivo ya que la zona más afectada por la erosión y el arrastre tendrá más material y por tanto la pérdida de parte de este material no afectará demasiado al desarrollo de una cobertura adecuada. Además, este material arrastrado sería depositado metros más abajo donde se compensaría la distribución desigual realizada al inicio logrando así una cobertura similar en toda la superficie del talud.

- Riego con solución nutritiva. Esta puede ser Knops como en nuestro caso u otras que puedan parecer más convenientes por otras razones como por ejemplo la solución Hoagland. En este caso los beneficios resultan evidentes, enriquecer el suelo con los nutrientes necesarios para que nuestro cultivo crezca en mejores condiciones.
- Por último, instalación de una red de materia orgánica, ya sea yute, coco u otra fibra similar. Las principales ventajas que aportaría esta técnica serían: frenar la erosión, tanto de sedimento como de propágulos, provocada por el agua de escorrentía; generar sombreado sobre los primeros centímetros de suelo, retén de los aportes de agua del ambiente y proporcionar un aporte de materia orgánica al suelo a medida que se degrada. Con ello mejoraremos la hidrología y la calidad del suelo y aportarían protección a los propágulos de vegetación.

Todas estas acciones, además de solucionar de manera eficaz y sinérgica la problemática de la zona de estudio, son poco invasivas, de fácil ejecución, de bajo mantenimiento y coste constituyendo, junto con el cultivo de costra biológica, una estrategia muy viable para lograr una rápida y exitosa restauración (Gómez, 2004; Magdaleno, 2011).

Conclusiones

Las conclusiones que se extraen después de la realización de este estudio son:

- La diversidad de especies de musgos alrededor del área de estudio es suficientemente adecuada y resiliente como para ser utilizada en una restauración exitosa del mismo.

- Los principales problemas del área de estudio que dificultan su revegetación son: la inclinación y altura del talud, la erosión provocada por el agua de escorrentía y las propiedades físico-químicas del sustrato.
- Las comunidades de briófitos presentan un crecimiento rápido en superficie, permitiendo la entrada posterior de otros grupos biológicos y mitigan eficazmente las problemáticas presentes en suelos degradados y taludes, generando un microecosistema sano y bastante resiliente en los primeros centímetros de suelo.
- Los briofitos y la recuperación de la costra biológica definitivamente constituyen una opción muy viable para lograr una restauración ecológica efectiva y duradera en nuestra área de estudio.

Referencias

- Adobe Systems. (2021). Adobe Photoshop (Versión 23) [Software de computadora].
- Antoninka, A., Bowker, M. A., Reed, S. C. y Doherty, K. (2016) “Production of greenhouse-grown biocrust mosses and associated cyanobacteria to rehabilitate dryland soil function”, *Restoration Ecology*, 24(3), pp. 324–335. <https://doi.org/10.1111/rec.12311>
- Bao, T., Zhao, Y., Gao, L., Yang, Q., *et al.* (2019) “Moss-dominated biocrusts improve the structural diversity of underlying soil microbial communities by increasing soil stability and fertility in the Loess Plateau region of China”, *European Journal of Soil Biology*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2019.103120>
- Bánki, O., Roskov, Y., Döring, M., Ower, G., *et al.* (2023) Catalogue of Life Checklist (Version 2023-05-15). Catalogue of Life. <https://doi.org/10.48580/dfs6>
- Bu, C., Li, R., Wang, C. y Bowker, M. A. (2018) “Successful field cultivation of moss biocrusts on disturbed soil surfaces in the short term”, *Plant and Soil*, 429(1–2), pp. 227–240. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3453-0>
- Bu, C., Wu, S., Han, F., Yang, Y., *et al.* (2015) “The combined effects of moss-dominated biocrusts and vegetation on erosion and soil moisture and implications for disturbance on the Loess Plateau, China”, *PLoS ONE*, 10(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127394>
- Casas de Puig, C., Barrón, A., Filella, I., Ruiz, E., *et al.* (2006) *Handbook of mosses of the Iberian Peninsula and the Balearic Islands : illustrated keys to genera and species*. Institut d’Estudis Catalans, Secció de Ciències Biològiques.
- Chiquoine, L. P., Abella, S. R., y Bowker, M. A. (2016) “Rapidly restoring biological soil crusts and ecosystem functions in a severely disturbed desert ecosystem”, *Ecological Applications*, 26(4), pp. 1260–1272. <https://doi.org/10.1002/15-0973>
- Clegg, J. S. (2001) “Cryptobiosis-a peculiar state of biological organization”, *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, 128, pp. 613-624.
- Climate-Data.org. (sin fecha). León, Spain - Climate data. Disponible en: <https://es.climate-data.org/europe/espana/castilla-y-leon/leon-718/> (Accedido: 15 de junio de 2023)
- Collado, M.A., Fernández Ordoñez, M.C (2003). *Briófitos de la Reserva Natural Integral de Muniellos*, Asturias: KRK ediciones.
- Concostrina-Zubiri, L., Arenas, J. M., Martínez, I., y Escudero, A. (2019) “Unassisted establishment of biological soil crusts on dryland road slopes”, *Web Ecology*, 19(1), pp. 39–51. <https://doi.org/10.5194/we-19-39-2019>
- Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F. T., Eldridge, D. J., Bowker, M. A. *et al.* (2016) “Biocrust-forming mosses mitigate the negative impacts of increasing aridity on ecosystem multifunctionality in drylands”, *New Phytologist*, 209(4), pp. 1540–1552. <https://doi.org/10.1111/nph.13688>
- Deeming, D. C., & Mainwaring M. C. (2015) “functional properties of nest”, en Charles Deeming, D., James Reynolds, S. (ed.) *Nests, Eggs, and Incubation: New ideas about avian reproduction*. 1ª edición. Oxford University Press, pp. 29-34.
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J. *et al.* (2019) “International principles and standards for the practice of ecological restoration”, Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1): S1–S46.

- García Álvarez, A. y Travieso, J.R. (eds.) (2014) *Restauración ecológica en minería. De la teoría a la práctica*. Madrid: Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Fundación Ciudad de la Energía.
- Gómez Orea, D. (2004). *Recuperación de Espacios Degradados*. Madrid: Mundi-Prensa Libros.
- Gubbay, S., Sanders, N., Haynes, T., Janssen, J. A. M. *et al.* (2016) *European Red list of habitats. Part 1, Marine habitats*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Heck, M. A., Lüth, V. M., van Gessel, N., Krebs, M. *et al.* (2021) “Axenic in vitro cultivation of 19 peat moss (*Sphagnum* L.) species as a resource for basic biology, biotechnology, and paludiculture”, *New Phytologist*, 229(2), pp. 861–876. <https://doi.org/10.1111/nph.16922>
- Hugonnot V., Celle J. y Pépin F. (2017). *Mousses et hépatiques de France: Manuel d'identification des espèces communes*. 2^o édition. Mèze: Biotope.
- IBM Corporation (2022). IBM SPSS Statistics (versión 28) [Software de análisis estadístico]. Recuperado de <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>
- Janssen, J. A. M., Rodwell, J. S., García Criado, M., Gubbay, S. *et al.* (2016). *European Red list of habitats. Part 2. Terrestrial and freshwater habitats*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Juan, J., Dongdong, L., YuanHang, F. y Pu, L. (2023) “Combined effects of moss colonization and rock fragment coverage on sediment losses, flow hydraulics and surface microtopography of carbonate-derived laterite from karst mountainous lands”, *Catena*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107202>
- Kubešová, S. y Chytrý, M. (2005) “Diversity of bryophytes on treeless cliffs and talus slopes in a forested central European landscape”, *Journal of Bryology*, 27(1), pp. 35–46. <https://doi.org/10.1179/174328205X40563>
- Magdaleno Mas, F. (2011) *Manual de técnicas de restauración fluvial*. Gobierno de España, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
- Microsoft Corporation (2013). Microsoft Excel 2013 Plus (Versión 15.0). Redmond, WA: Microsoft Corporation.
- Muñoz-Rojas, M., Machado de Lima, N. M., Chamizo, S. y Bowker, M. A. (2021) “Restoring post-fire ecosystems with biocrusts: Living, photosynthetic soil surfaces”, *Current Opinion in Environmental Science and Health* (23). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100273>
- Pope, R. (2016) *Mosses, Liverworts, and Hornworts: A Field Guide to Common Bryophytes of the Northeast*. Ithaca: Cornell University Press.
- Rosentreter, R. (2020) “Biocrust lichen and moss species most suitable for restoration projects”, *Restoration Ecology*, 28(2), pp. 67–74, Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/rec.13082>
- Rosentreter, R. y Root, H. T. (2019) “Biological soil crust diversity and composition in southwest Idaho, USA” *The Bryologist*, 122(1), 10–22. <https://doi.org/10.1639/0007-2745-122.1.010>
- Sahu, V., y Asthana, A. K. (2013) “An observation on growth response of anomobryum filiforme var. concinnatum (Spruce) Aman. (Bryaceae) in different culture media”, *National Academy Science Letters*, 36(6), pp. 587–589. <https://doi.org/10.1007/s40009-013-0173-8>
- Sahu, V., Rawat, K. K., Srivastava, A. y Asthana, A. K. (2017) “In vitro Propagation of Saprophytic Moss *Splachnum sphaericum* Hedw.”, *International Journal of Plant and Environment*, 3(02), pp. 47–50. <https://doi.org/10.18811/ijpen.v3i02.10436>
- SEB- Sociedad Española de Briología (2007-2020) *Flora Briofítica Ibérica*.
- Sushko, G. (2019) “Key factors affecting the diversity of *Sphagnum* cover inhabitants with the focus on ground beetle assemblages in Central-Eastern European peat bogs”, *Community Ecology*, 20(1), pp. 45–52. <https://doi.org/10.1556/168.2019.20.1.5>
- Suárez-Rodríguez, A., Heredia Carballo, N., Nozal Martín, F. y Rodríguez Fernández, L. R. (IGME) (2005) “Mapa geológico de España 161 = 13-9 León”. Madrid: Servicio de Publ., Ministerio de Industria y Energía.
- Unión internacional para la conservación de la naturaleza, (2020) Informe anual 2019. Recuperado de: <https://www.iucn.org/es/resources/annual-reports/iucn-2019-union-internacional-para-la-conservacion-de-la-naturaleza>
- Valladares, F., Balaguer, L., Mola, I., Escudero, A., *et al.* (eds.) (2011) *Restauración ecológica de áreas afectadas por infraestructuras de transporte Bases científicas para soluciones técnicas*. Fundación Biodiversidad, Madrid, España.
- Weber, B., Belnap, J., Büdel, B., Antoninka, A. J. *et al.* (2022) “What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening research community”, *Biological Reviews*, 97(5), pp. 1768–1785. <https://doi.org/10.1111/brv.12862>
- Zhang, X., Zhao, Y. y Wang, S. (2017) “Responses of antioxidant defense system of epilithic mosses to drought stress in karst rock desertified areas” *Acta Geochimica*, 36(2), pp. 205–212. <https://doi.org/10.1007/s11631-017-0140-z>

Anexo I

Clave dicotómica de las especies presentes en los taludes objeto de estudio:

- 1- Musgo acrocárpico 3
 - Musgo pleurocárpico 2

- 2- Con nervio ***Brachythecium sp.***
 - Sin nervio..... ***Hypnum cupressiforme var. lacunosum***

- 3- Células medias del filidio romboidales o hexagonales 4
 - Células medias de otra forma (cuadradas, rectangulares, isodiamétricas) 5

- 4- Células del ápice verdes, filidios retorcidos en seco, óvalo espatulados, cápsula piriforme..... ***Bryum capillare***
 - Células del ápice hialinas, filidios muy ovalados, cápsula ovoide ...***Bryum argenteum***

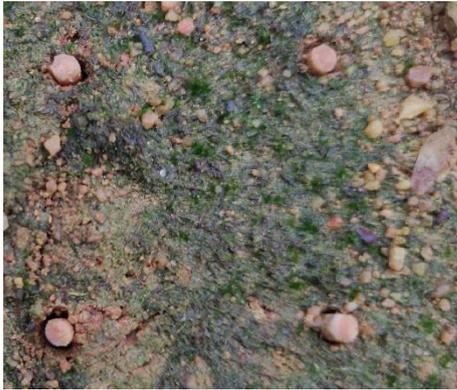
- 5- Filidio con pelo hialino..... 6
 - Filidio sin pelo hialino 7

- 6- Filidio con lamelas longitudinales sobre el lado ventral, caulidio denudado en la parte inferior..... ***Polytrichum piliferum***
 - Filidio sin lamelas, pelo hialino fuertemente dentado, nervio grueso***Syntrichia ruralis***

- 7- Células medias isodiamétricas, filidios imbricados en seco..... ***Didymodon sp.***
 - Células medias cuadradas, filidios erecto-patentes en seco, esporofitos muy abundantes, dientes del peristoma papilosos ***Ceratodon purpureus subsp. purpureus.***

Anexo II

1



2



3



4



5



6



Figura A.1. Serie de fotografías de una de las unidades de muestreo a lo largo del tiempo de cultivo. (1) fotografía correspondiente a T1 (2) fotografía correspondiente a T2 (3) fotografía correspondiente a T3 (4) fotografía correspondiente a T4 (5) fotografía correspondiente a T5 (6) fotografía correspondiente a T6.