

# Role of biological soil crust and soil microbial communities in the recovery of burned soils exposed to post-fire management

*El papel de las costras biológicas y comunidades microbianas edáficas en la recuperación de suelos quemados sometidos a manejos post-incendio*

MINERVA GARCÍA CARMONA



Director de la tesis

**Dr. Jorge Mataix Solera**

Codirectora de la tesis

**Dra. Fuensanta García Orenes**

- Introducción
- Objetivos
- Material y Métodos
- **CHAPTER 3.** Salvage logging alters microbial community structure and functioning after a wildfire in a Mediterranean forest
- **CHAPTER 4.** The role of mosses in soil stability, fertility and microbiology six years after a post-fire salvage logging management
- **CHAPTER 5.** Moss biocrust accelerates the recovery and resilience of soil microbial communities in fire-affected semi-arid Mediterranean soils
- **CHAPTER 6.** Post-fire wood mulch modulates the biocrust-forming mosses response and the soil fungal community composition
- **CHAPTER 7.** Contrasting organic amendments induce different short-term responses in soil abiotic and biotic properties in a fire-affected native Mediterranean forest in Chile
- Discusión general
- Conclusiones



**¿Mitigación de la amenaza o desencadenar procesos degradativos?**

fotos: J. Mataix

## MANEJOS POST-INCENDIO EN ECOSISTEMAS MEDITERRÁNEOS

Aprovechamiento  
de la madera



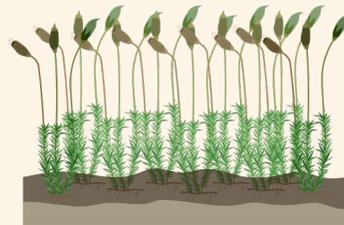
Estabilización del  
suelo frente erosión



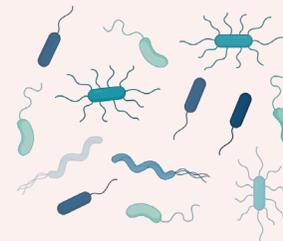
Restauración del  
ecosistema



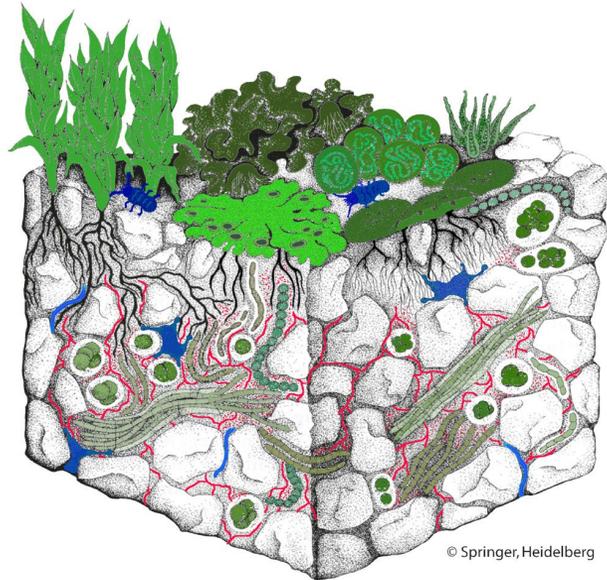
Biocostras dominadas  
por musgos



Comunidades microbianas  
del suelo



## BIOCOSTRAS DOMINADAS POR MUSGOS



Papel en la recuperación de un suelo post incendio??

- Colonizadores post-incendio
- Dominio transitorio
- Ingenieros de ecosistemas



## COMUNIDADES MICROBIANAS DEL SUELO

Respuesta para evaluar y guiar el proceso de recuperación

- Indicadores de perturbación
- Mantenimiento de funciones ecosistémicas



foto: A. Girona

## OBJETIVOS

Evaluar los efectos de los manejos forestales sobre la recuperación de suelos en bosques mediterráneos afectados por incendios, centrándose en los efectos sobre los las biocostras de musgos y las comunidades microbianas del suelo, y su relación con el ambiente post-incendio.

- 1** Determinar los **efectos en los suelos de manejos forestales con enfoques diferentes**, incluyendo la extracción de madera quemada, la protección del suelo y las prácticas de restauración.
- 2** Dilucidar la **relevancia de los musgos formadores de biocostras** en la recuperación y resiliencia de los suelos perturbados.
- 3** Evaluar la **respuesta de las comunidades microbianas** a los diferentes manejos, a la presencia de la biocostra, e identificar las propiedades del suelo responsables de los cambios en su diversidad y composición.

## QUÉ

### Tala y extracción de la madera quemada

- Fuente de perturbación
- No-intervención



### Mulch con astillado de madera

- Con material de la extracción



### Aplicación de enmiendas orgánicas

- Diferente origen y estabilidad



## CÓMO

### Propiedades del suelo

- Contenido nutrientes
- Estabilidad física
- Propiedades biológicas y bioquímicas



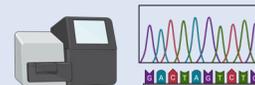
### Biocostras de musgo

- Cobertura
- Efecto de la biocostra en el suelo



### Comunidades microbianas

- Secuenciación de amplicones, hongos y bacterias



## POR QUÉ



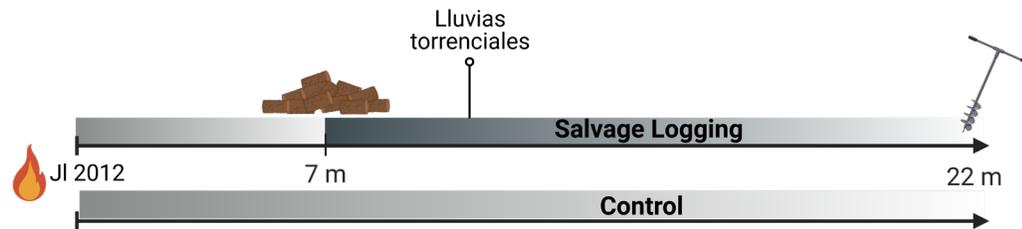
- **Evaluar la respuesta** de los suelos a las perturbaciones por manejos post-incendio
- **Guiar la gestión forestal** hacia la conservación del suelo y la resiliencia del ecosistema

## CHAPTER 3

### Salvage logging alters microbial community structure and functioning after a wildfire in a Mediterranean forest

Applied Soil Ecology, 168, 104-130 (2021)

¿La tala y saca de madera, como perturbación adicional al incendio, impacta la composición y diversidad de las comunidades microbianas del suelo? ¿Tiene repercusiones para la recuperación de un ecosistema propenso a la degradación?



#### Hipótesis

- Incendio + Tala = alteración profunda la composición de la comunidad y menor diversidad microbiana.
- La funcionalidad microbiana en suelos manejados es menor que en los suelos sin intervención.

## 1 Manejos intensivos degradan el ecosistema

La tala y saca de madera en suelos altamente erosionables degradan el suelo e impactan las comunidades microbianas.



Control

Salvage Logging

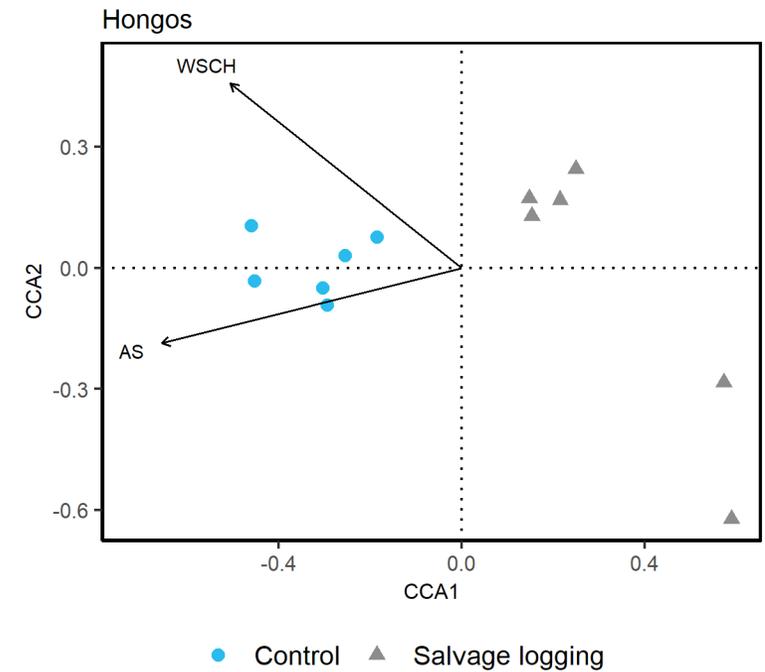
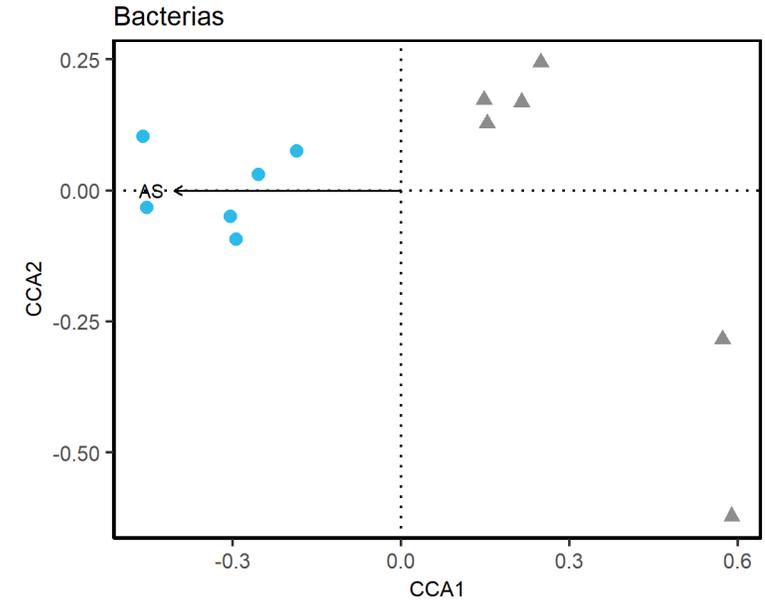
Materia Orgánica (%)	7.25	2.80
Nitrógeno (%)	0.29	0.12
Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> )	37	6
Biomasa Microbiana (mg C kg <sup>-1</sup> )	1160	568
Deshidrogenasa (μg INTF g <sup>-1</sup> )	30	16.7
Ureasa (μmol N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	1.12	0.57
β-glucosidasa (μmol PNP g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	2.12	0.73

## 1 Manejos intensivos degradan el ecosistema

La tala y saca de madera en suelos altamente erosionables degradan el suelo e impactan las comunidades microbianas.

## 2 Deterioro de la estructura altera profundamente las comunidades microbianas

La destrucción de estructura del suelo responsable de los cambios en las comunidades de bacterias y hongos.



### 1 Manejos intensivos degradan el ecosistema

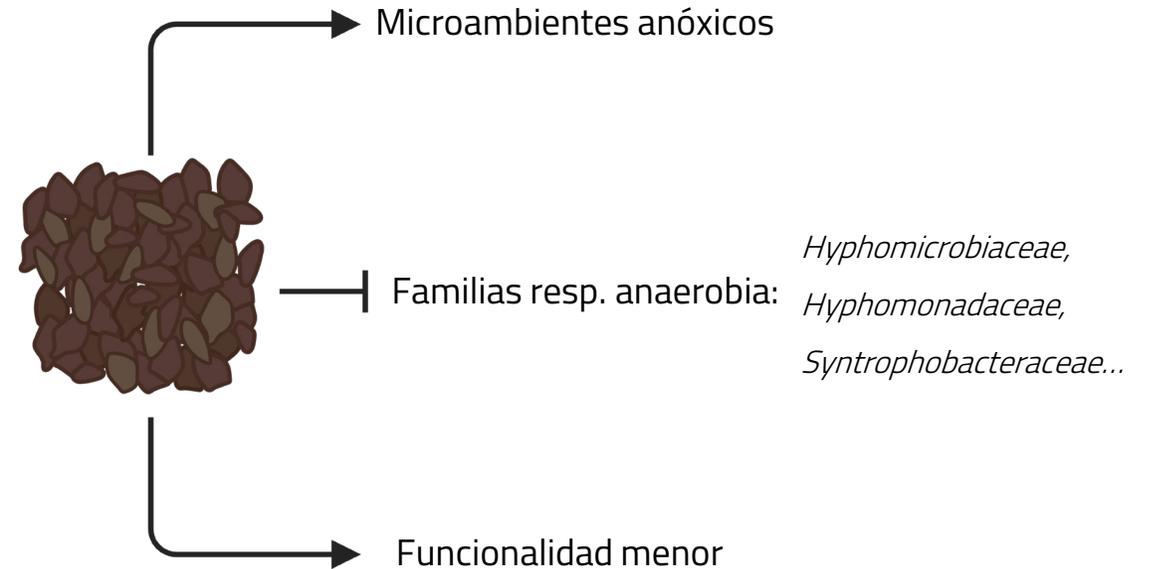
La tala y saca de madera en suelos altamente erosionables degradan el suelo e impactan las comunidades microbianas.

### 2 Deterioro de la estructura altera profundamente las comunidades microbianas

La destrucción de estructura del suelo responsable de los cambios en las comunidades de bacterias y hongos.

### 3 Mayor alfa diversidad en suelos degradados tras creación de microambientes anóxicos

Proliferación de familias con respiración anóxica asociadas a pérdida de estructura.



## 1 Manejos intensivos degradan el ecosistema

La tala y saca de madera en suelos altamente erosionables degradan el suelo e impactan las comunidades microbianas.

## 2 Deterioro de la estructura altera profundamente las comunidades microbianas

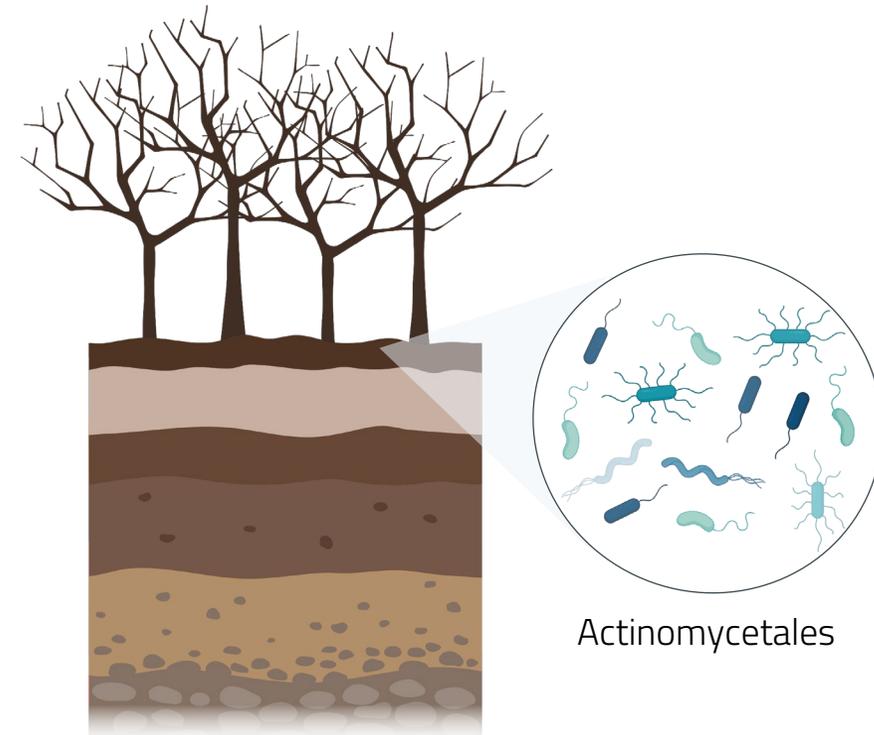
La destrucción de estructura del suelo responsable de los cambios en las comunidades de bacterias y hongos.

## 3 Mayor alfa diversidad en suelos degradados tras creación de microambientes anóxicos

Proliferación de familias con respiración anóxica asociadas a pérdida de estructura.

## 4 Madera quemada, el legado biológico en post-incendio

La no intervención genera mosaico de microambientes y variedad de sustratos que promueve desarrollo microbiano especializado en degradación.

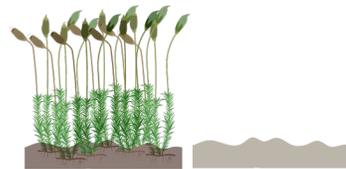
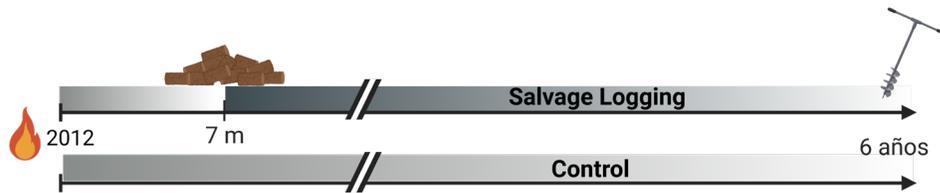


## CHAPTER 4

### The role of mosses in soil stability, fertility and microbiology six years after a post-fire salvage logging management

Journal of environmental management, 262, 110287 (2020)

¿Cuál es el papel que tiene una biocostra dominada por musgos en la recuperación de la funcionalidad de un suelo afectado por incendio y posterior manejo tala y saca de madera?



Musgo vs. Suelo desnudo

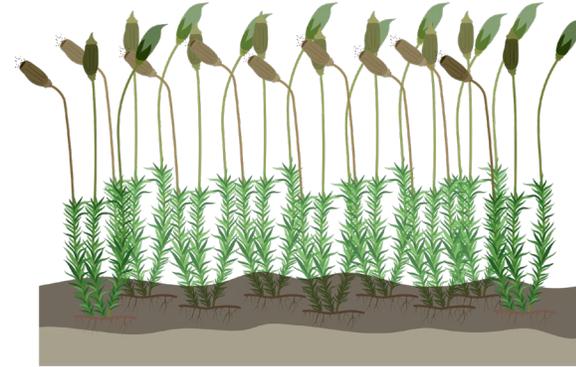


#### Hipótesis

- Biocostra tiene un papel relevante en la recuperación del suelo afectado por el incendio y manejo forestal, mejorando la hidrología y estabilidad del suelo, la fertilidad y su biología.
- Desarrollo de la biocostra se ve afectada negativamente por el manejo forestal

## 1 Biocostra ayuda a recuperar múltiples funciones suelo

La presencia de biocostra mitiga la amenaza de la degradación post perturbaciones (incendio y manejo forestal) recuperando múltiples funciones del suelo.



Estabilidad ✓  
Fertilidad ✓  
Microbiología ✓

Hidrología ✗

## 1 Biocostra ayuda a recuperar múltiples funciones suelo

La presencia de biocostra mitiga la amenaza de la degradación post perturbaciones (incendio y manejo forestal) recuperando múltiples funciones del suelo.

## 2 Estabilidad del suelo

Retención de cenizas y freno a la pérdida de suelo por erosión.



Retención de cenizas



Pérdida de suelo alrededor de parches de musgo

### 1 Biocostra ayuda a recuperar múltiples funciones suelo

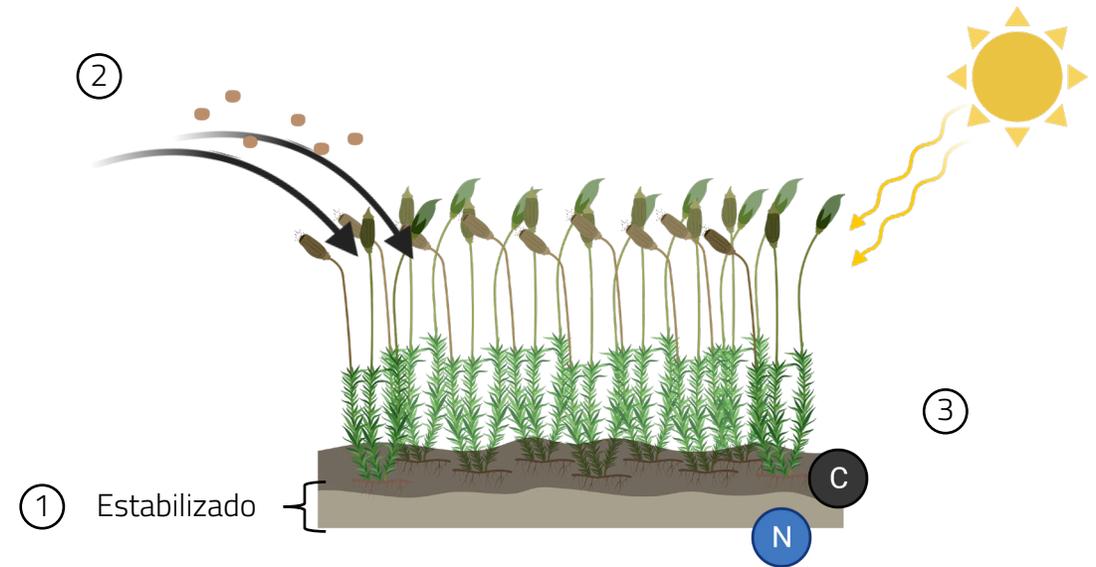
La presencia de biocostra mitiga la amenaza de la degradación post perturbaciones (incendio y manejo forestal) recuperando múltiples funciones del suelo.

### 2 Estabilidad del suelo

Retención de cenizas y freno a la pérdida de suelo por erosión.

### 3 Incremento en la fertilidad del suelo

1) estabilización suelo post-incendio; 2) trampas de partículas (micronutrientes); 3) fijadores de C y N.



		CO (%)	N (%)	P (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Control	Suelo Desnudo	2.44 a	0.18 ab	6.2 a	1.09 a	0.33 a
	Musgo	3.16 b	0.23 c	7.9 ab	1.46 ab	0.32 a
SL	Suelo Desnudo	1.90 a	0.16 a	5.7 a	1.25 a	0.38 ab
	Musgo	2.36 a	0.20 bc	11.4 b	1.75 b	0.53 b

## 1 Biocostra ayuda a recuperar múltiples funciones suelo

La presencia de biocostra mitiga la amenaza de la degradación post perturbaciones (incendio y manejo forestal) recuperando múltiples funciones del suelo.

## 2 Estabilidad del suelo

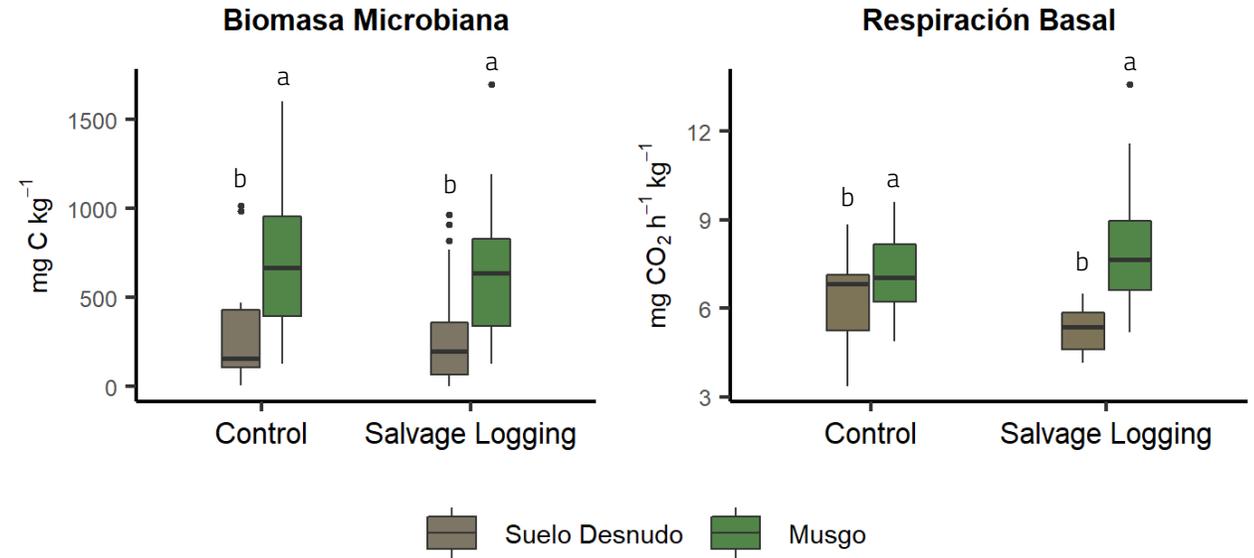
Retención de cenizas y freno a la pérdida de suelo por erosión.

## 3 Incremento en la fertilidad del suelo

1) estabilización suelo post-incendio; 2) trampas de partículas (micronutrientes); 3) fijadores de C y N.

## 4 Impulso a las comunidades microbianas

Se acelera la recuperación de la microbiota del suelo en abundancia y actividad, gracias a la protección frente a condiciones adversas y el input de nutrientes.



## 1 Biocostra ayuda a recuperar múltiples funciones suelo

La presencia de biocostra mitiga la amenaza de la degradación post perturbaciones (incendio y manejo forestal) recuperando múltiples funciones del suelo.

## 2 Estabilidad del suelo

Retención de cenizas y freno a la pérdida de suelo por erosión.

## 3 Incremento en la fertilidad del suelo

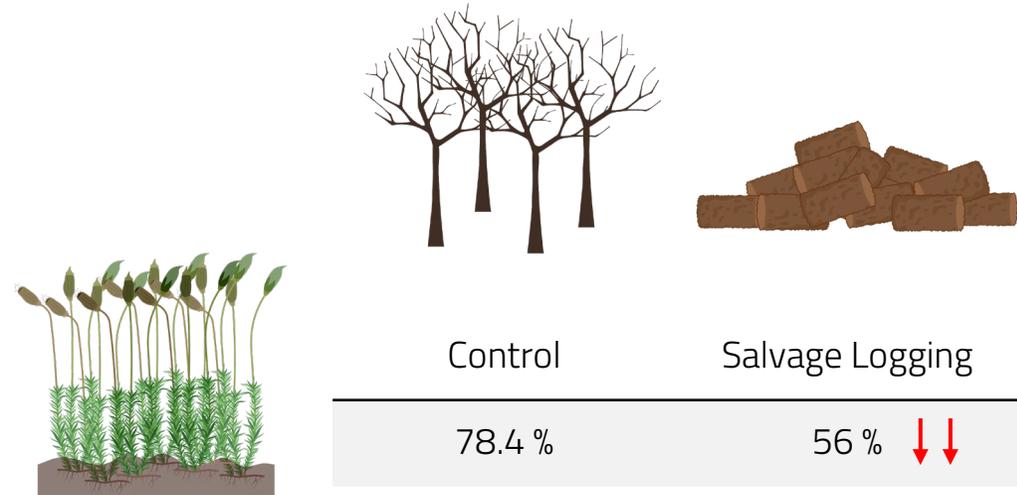
1) estabilización suelo post-incendio; 2) trampas de partículas (micronutrientes); 3) fijadores de C y N.

## 4 Impulso a las comunidades microbianas

Se acelera la recuperación de la microbiota del suelo en abundancia y actividad, gracias a la protección frente a condiciones adversas y el input de nutrientes.

## 5 Tala y saca de madera afecta negativamente el desarrollo de biocostra

La cobertura de biocostra se reduce en más de un 20% en comparación con los suelos sin intervenir.

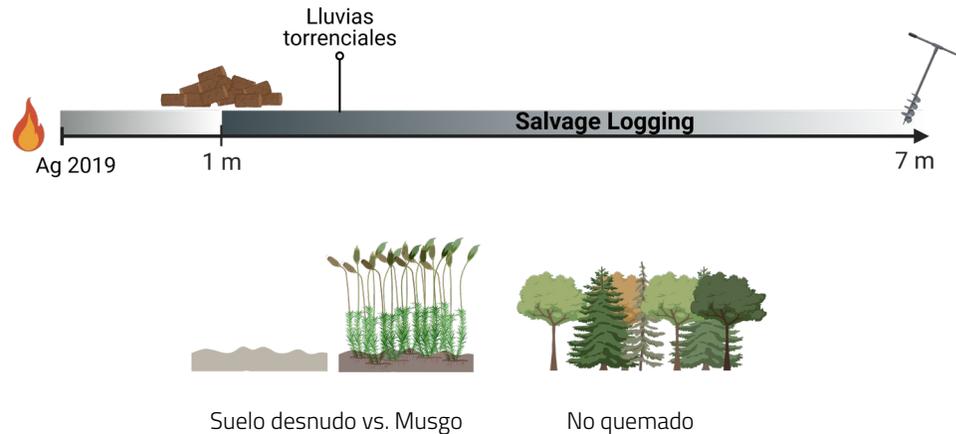


## CHAPTER 5

# Moss biocrust accelerates the recovery and resilience of soil microbial communities in fire-affected semi-arid Mediterranean soils

Science of the Total Environment, 846, 157467 (2022)

¿Tiene relevancia la aparición temprana de la biocostra en la funcionalidad del suelo afectado por incendio y tala y saca de madera? ¿Repercusión en la recuperación y resiliencia de las comunidades microbianas del suelo?

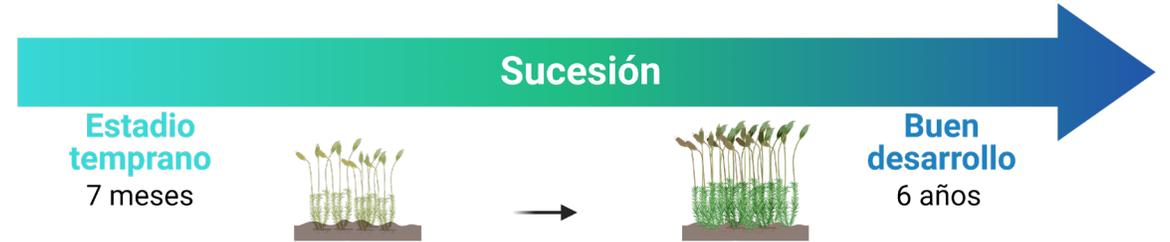


### Hipótesis

- Las comunidades microbianas se ven beneficiadas por la presencia de la biocostra → mitigación del estrés y mejora de las propiedades del suelo
- Las comunidades microbianas bajo la biocostra son más abundantes y diversas que sin biocostra, acelerando su recuperación

## 1 El estado de desarrollo de la biocostra importa

Las funciones previstas al suelo por la biocostra dependen de su estado de desarrollo, excepto la estabilidad al suelo.



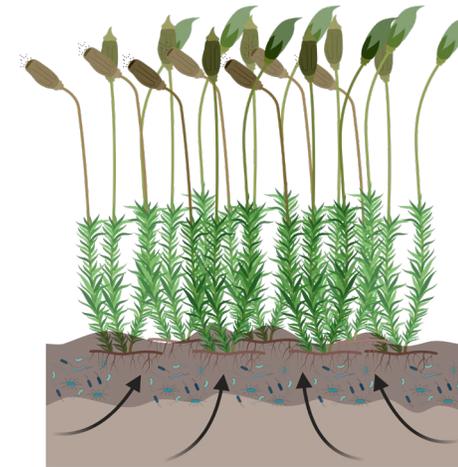
## 1 El estado de desarrollo de la biocostra importa

Las funciones previstas al suelo por la biocostra dependen de su estado de desarrollo, excepto la estabilidad al suelo.

## 2 No efecto en la fertilidad

1) Consumo y agotamiento transitorio de las formas lábiles de C y N por la microbiota y el musgo; 2) Las biocostras establecidas donde el C es menos recalcitrante (no hidrofobicidad).

①



	Suelo Desnudo	Musgo	No quemado
Carbono Orgánico (%)	4.18 ab	3.97 b	5.53 a
Humedad del Suelo (%)	13.5 b	18.7 a	12.7 b
Biomasa Microbiana (mg C kg <sup>-1</sup> )	184 c	296 b	753 a

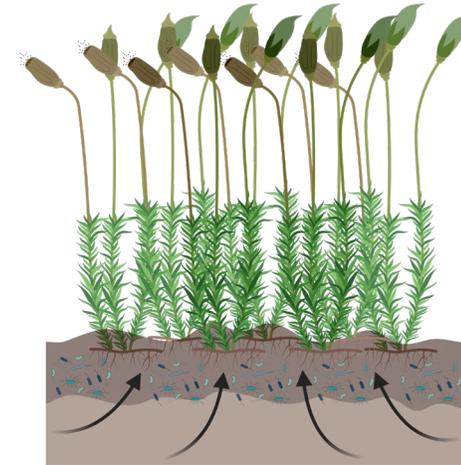
## 1 El estado de desarrollo de la biocostra importa

Las funciones previstas al suelo por la biocostra dependen de su estado de desarrollo, excepto la estabilidad al suelo.

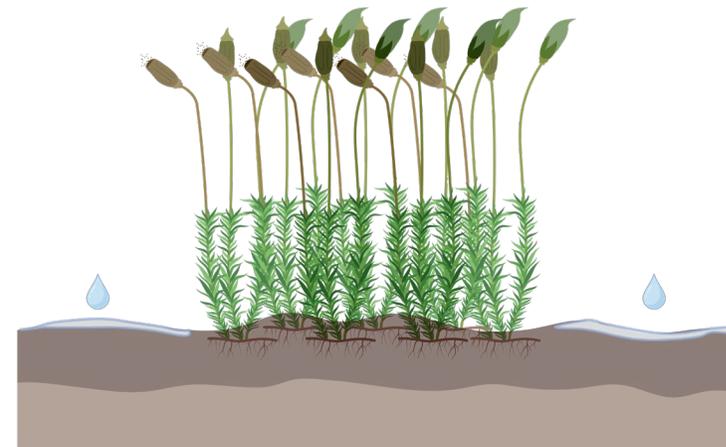
## 2 No efecto en la fertilidad

1) Consumo y agotamiento transitorio de las formas lábiles de C y N por la microbiota y el musgo; 2) Las biocostras establecidas donde el C es menos recalcitrante (no hidrofobicidad).

①



②



### 1 El estado de desarrollo de la biocostra importa

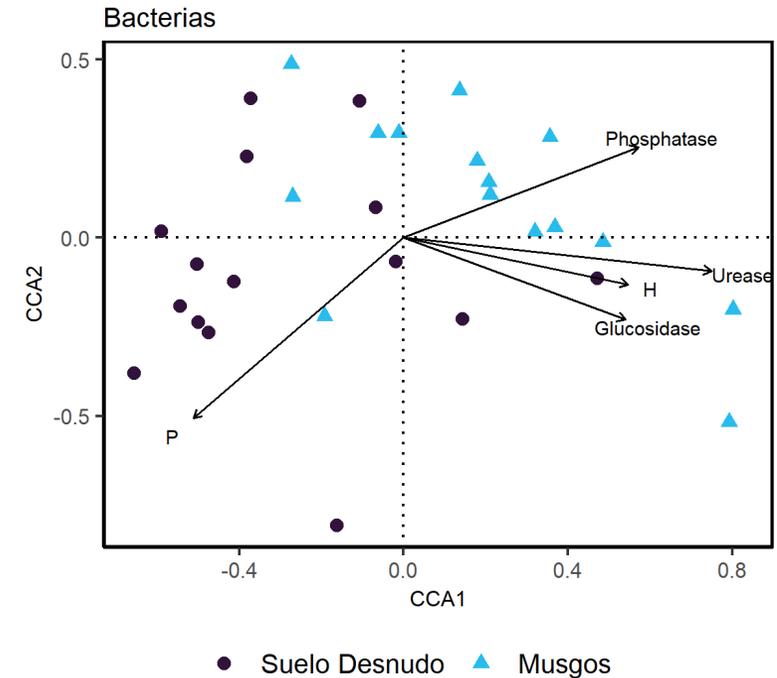
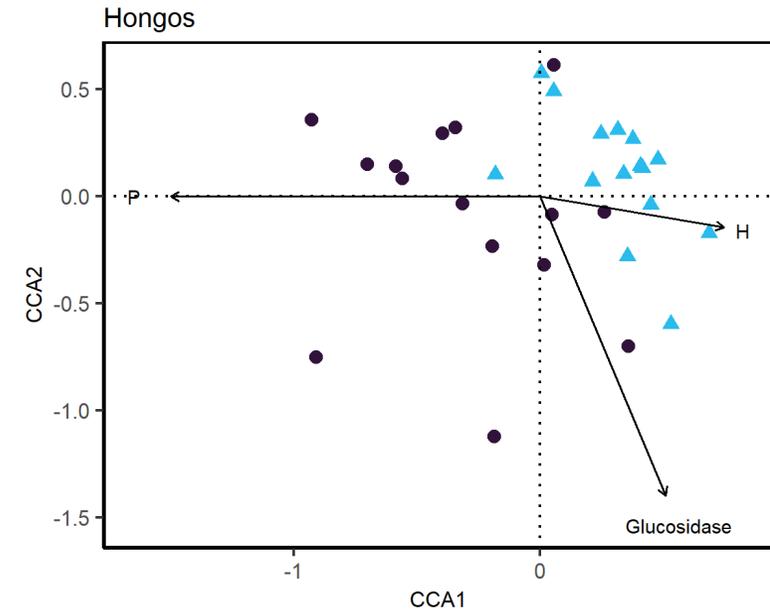
Las funciones previstas al suelo por la biocostra dependen de su estado de desarrollo, excepto la estabilidad al suelo.

### 2 No efecto en la fertilidad

1) Consumo y agotamiento transitorio de las formas lábiles de C y N por la microbiota y el musgo; 2) Las biocostras establecidas donde el C es menos recalcitrante (no hidrofobicidad).

### 3 Incipiente aceleración procesos bioquímicos

Mitigación condiciones estresantes superficie y alteración de propiedades del suelo críticas en sistemas áridos, filtran en el ensamblaje de las comunidades microbianas.



## 1 El estado de desarrollo de la biocostra importa

Las funciones previstas al suelo por la biocostra dependen de su estado de desarrollo, excepto la estabilidad al suelo.

## 2 No efecto en la fertilidad

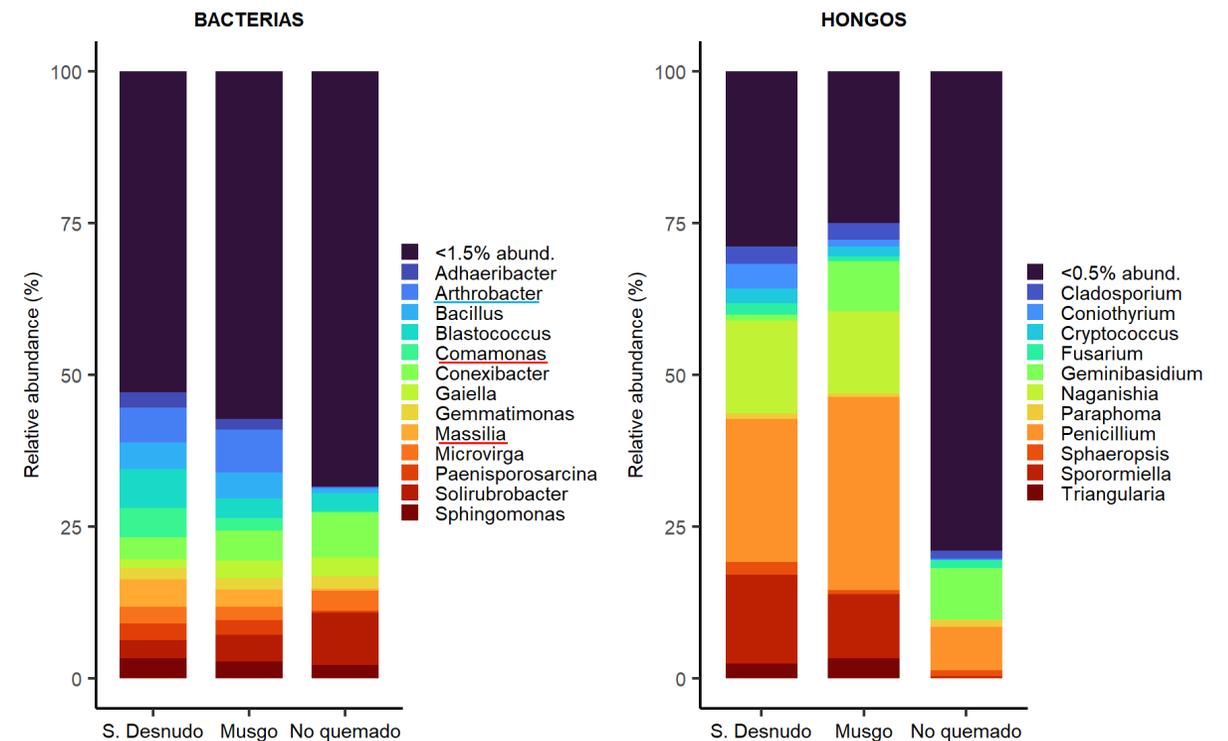
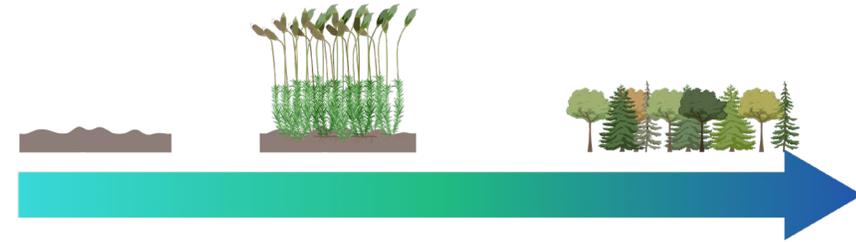
1) Consumo y agotamiento transitorio de las formas lábiles de C y N por la microbiota y el musgo; 2) Las biocostras establecidas donde el C es menos recalcitrante (no hidrofobicidad).

## 3 Incipiente aceleración procesos bioquímicos

Mitigación condiciones estresantes superficie y alteración de propiedades del suelo críticas en sistemas áridos, filtran en el ensamblaje de las comunidades microbianas.

## 4 Favorece la recuperación y resiliencia de comunidades microbianas

Mayor diversidad (bacterias) en biocostras, acelerando la transición hacia la recuperación. Disminución de Proteobacterias copiotróficas.

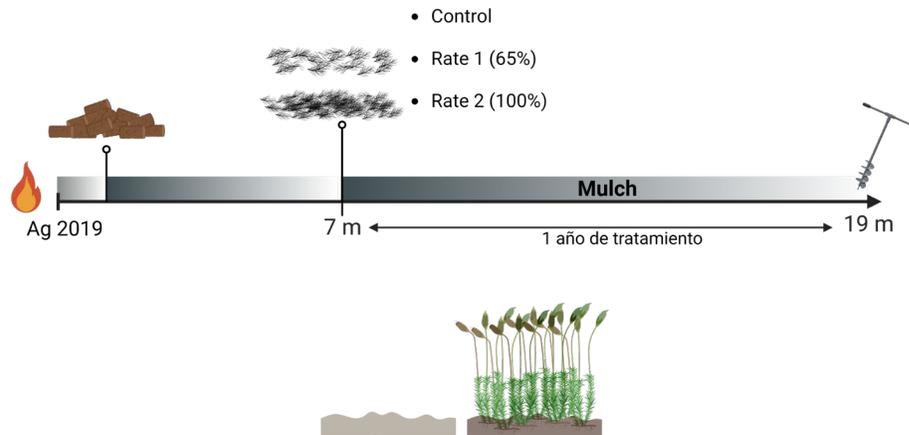


## CHAPTER 6

### Post-fire wood mulch modulates the biocrust-forming mosses response and the soil fungal community composition

Applied Soil Ecology, 191, 105026 (2023)

¿Cómo interactúan las biocostras con la aplicación de mulch?, ¿cómo se ven afectadas las comunidades microbianas y cómo repercute en la resistencia y resiliencia tras la perturbación por incendio?

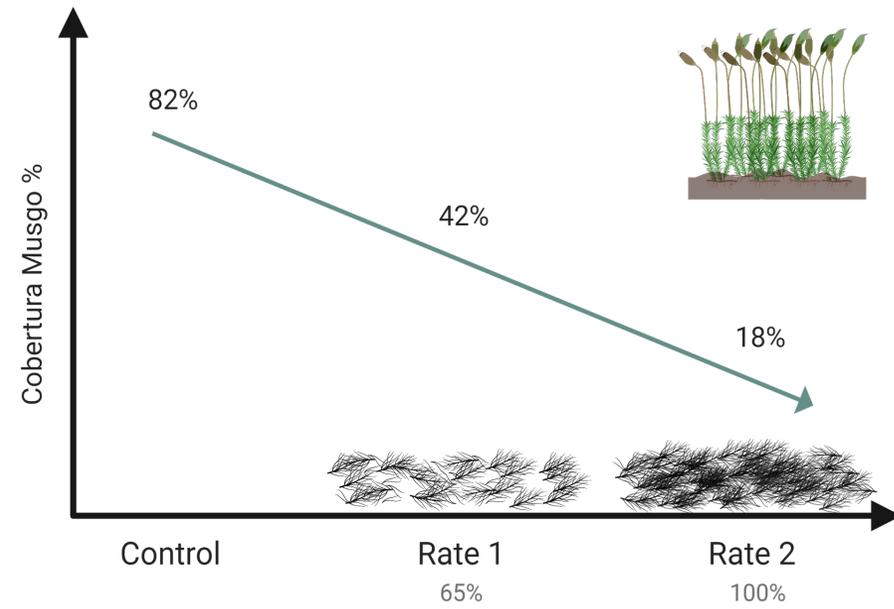


#### Hipótesis

- Mulch favorece la actividad, abundancia y diversidad de las comunidades microbianas → introducción de nutrientes y la mejora de las condiciones físicas.
- Mulch interactúa negativamente con el desarrollo de la biocostra.

**1 Mulch inhibe el desarrollo de la biocostra.**

El manejo post-incendio entra en conflicto con el potencial de los musgos para restaurar el suelo.

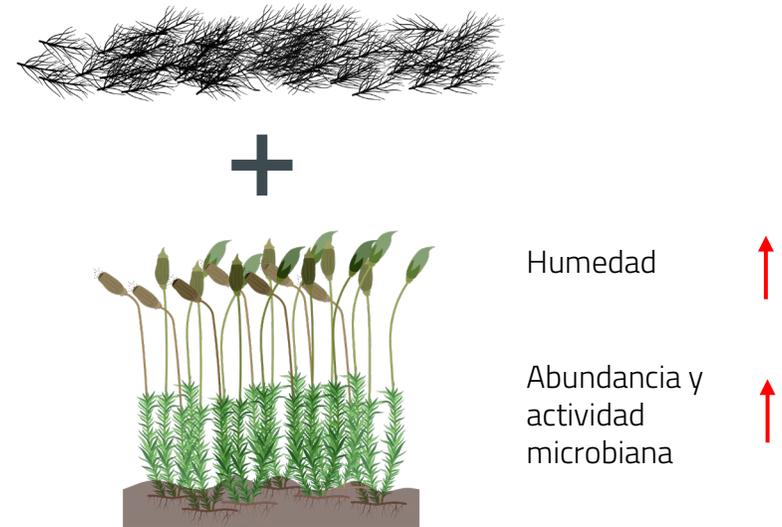


**1 Mulch inhibe el desarrollo de la biocostra.**

El manejo post-incendio entra en conflicto con el potencial de los musgos para restaurar el suelo.

**2 Descomposición de madera y presencia de biocostra estimulan los procesos bioquímicos**

Mejoran las condiciones de humedad, aumenta la abundancia microbiana, estimulando así su actividad.



### 1 Mulch inhibe el desarrollo de la biocostra.

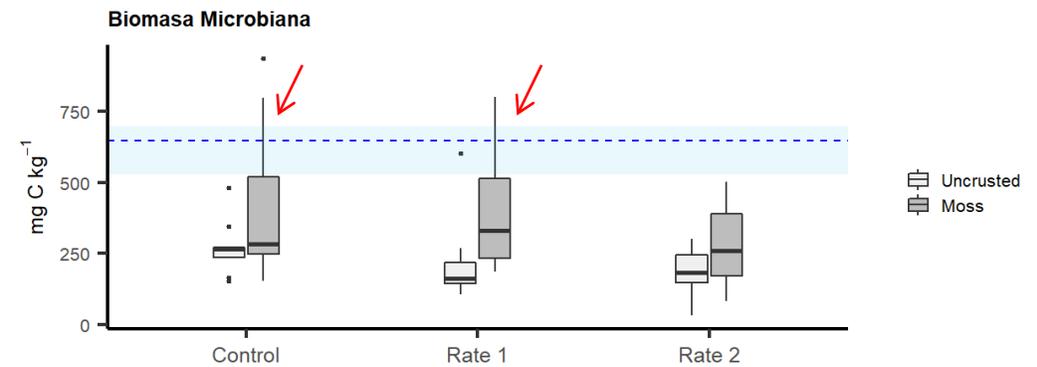
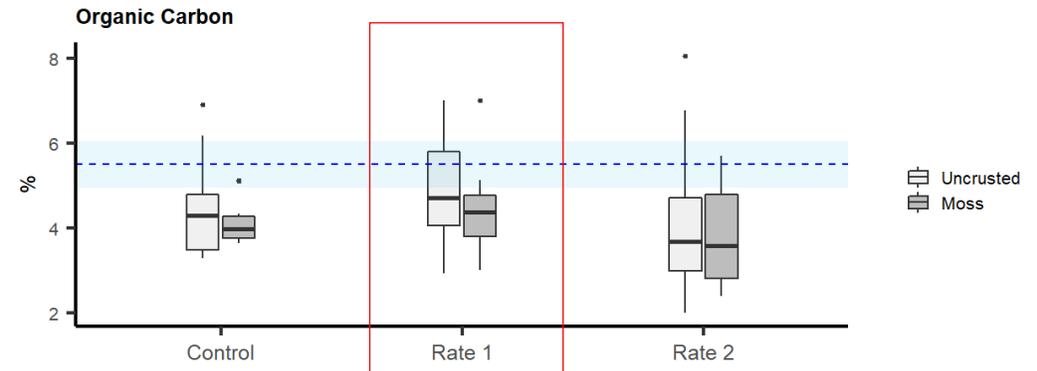
El manejo post-incendio entra en conflicto con el potencial de los musgos para restaurar el suelo.

### 2 Descomposición de madera y presencia de biocostra estimulan los procesos bioquímicos

Mejoran las condiciones de humedad, aumenta la abundancia microbiana, estimulando así su actividad.

### 3 Efecto positivo del mulch notable en la dosis baja de aplicación

Simulando la heterogeneidad del suelo forestal, suelos bajo 65% mulch tienden a mayor CO, N, biomasa microbiana y respiración, recuperando funcionalidad.



### 1 Mulch inhibe el desarrollo de la biocostra.

El manejo post-incendio entra en conflicto con el potencial de los musgos para restaurar el suelo.

### 2 Descomposición de madera y presencia de biocostra estimulan los procesos bioquímicos

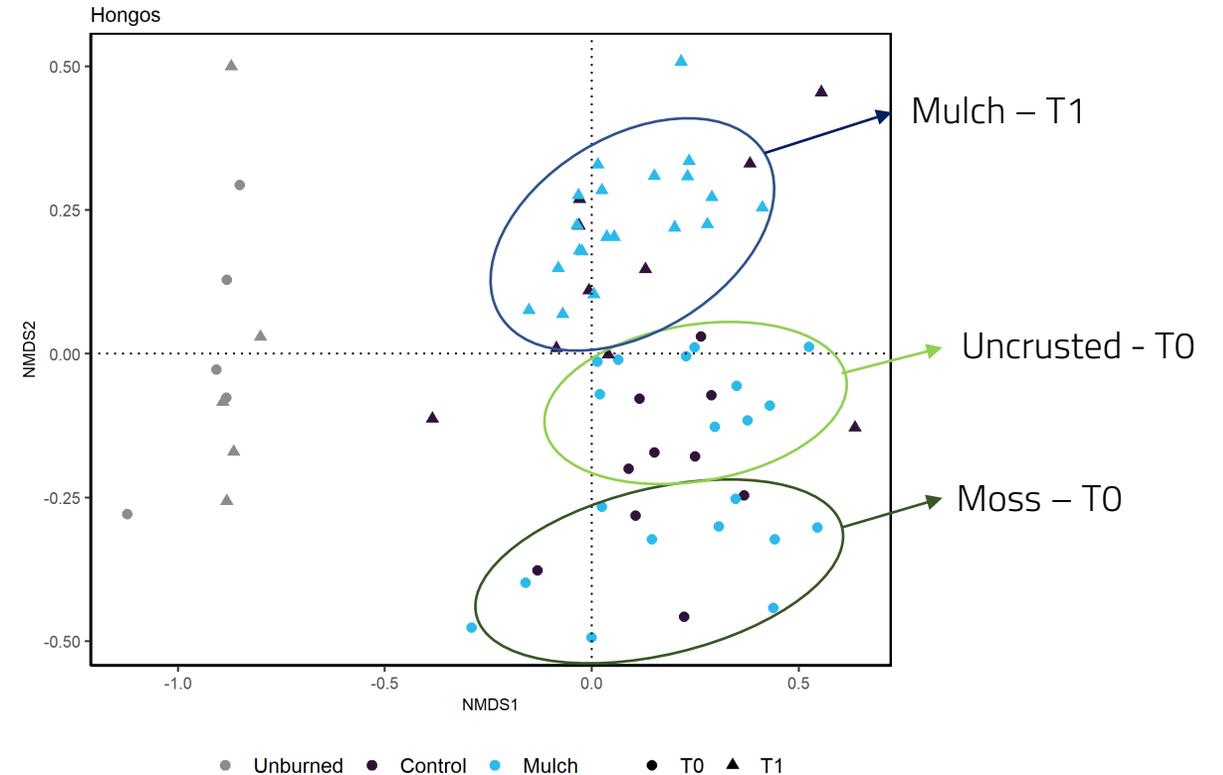
Mejoran las condiciones de humedad, aumenta la abundancia microbiana, estimulando así su actividad.

### 3 Efecto positivo del mulch notable en la dosis baja de aplicación

Simulando la heterogeneidad del suelo forestal, suelos bajo 65% mulch tienden a mayor CO, N, biomasa microbiana y respiración, recuperando funcionalidad.

### 4 Mulch reduce la diversidad microbiana

Las comunidades microbianas bajo ambas dosis se vuelven transitoriamente más homogéneas, menos diversas que con la biocostra.





## CHAPTER 7

# Contrasting organic amendments induce different short-term responses in soil abiotic and biotic properties in a fire-affected native Mediterranean forest in Chile

Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21(3), 2105-2114 (2021)

¿Cómo responde un suelo perturbado por incendio, y su microbiología, ante la adición de distintas enmiendas orgánicas, caracterizadas por diferente origen y estabilidad, con el objetivo restaurar el ecosistema afectado?



### Hipótesis

- Materiales frescos → activación rápida, pero transitoria, de los parámetros microbiológicos.
- Materiales estables → promueven la fertilidad del suelo

**1** Todas las enmiendas orgánicas mejoran la fertilidad del suelo y estimulan la actividad microbiológica

Pero se esperan efectos variables en el suelo en el tiempo (duraderos vs. efímeros).



- Biomasa microbiana
- Actividad microbiana
- Fertilidad
- Estructura del suelo
- Capacidad de Campo
- Establecimiento de la vegetación

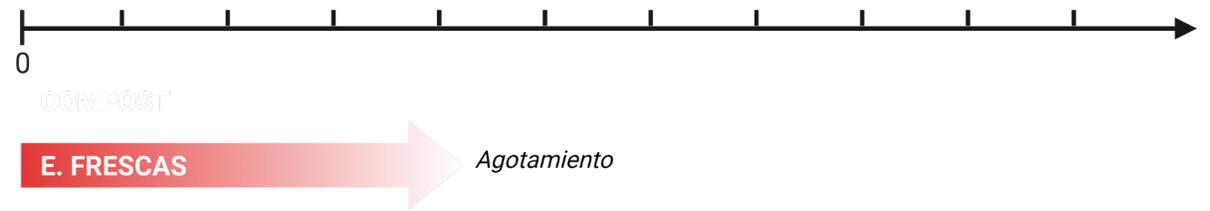
**1** Todas las enmiendas orgánicas mejoran la fertilidad del suelo y estimulan la actividad microbiológica

Pero se esperan efectos variables en el suelo en el tiempo (duraderos vs. efímeros).

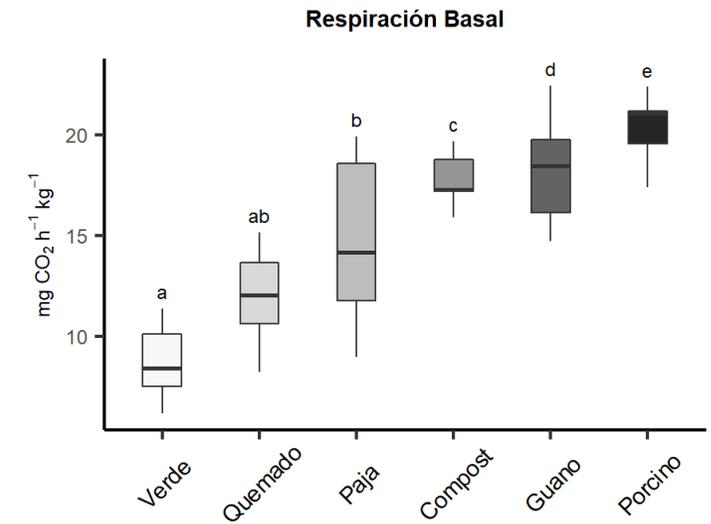
**2** Las enmiendas frescas promueven un crecimiento y actividad microbiana inmediata, pero mayor tasa de mineralización

Los abonos tendrán un consumo de C más rápido en el tiempo, en especial el estiércol porcino.

Duración del efecto en el suelo



- Biomasa microbiana ↑
- Actividad microbiana ↑
- Descomposición rápida  
→ *Estiércol porcino*



**1** Todas las enmiendas orgánicas mejoran la fertilidad del suelo y estimulan la actividad microbiológica

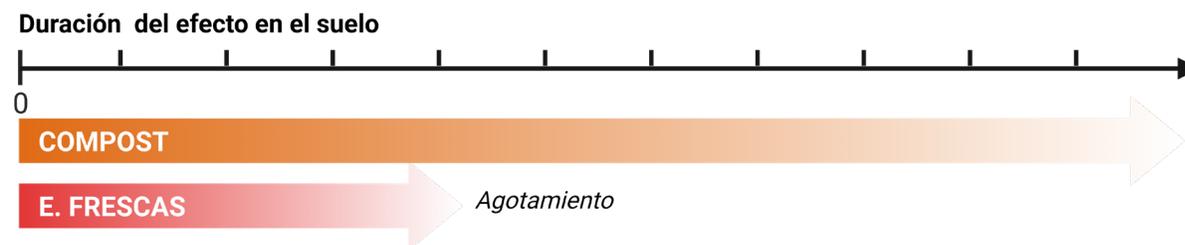
Pero se esperan efectos variables en el suelo en el tiempo (duraderos vs. efímeros).

**2** Las enmiendas frescas promueven un crecimiento y actividad microbiana inmediata, pero mayor tasa de mineralización

Los abonos tendrán un consumo de C más rápido en el tiempo, en especial el estiércol porcino.

**3** Los suelos con compost acumulan mayor CO y N

Aseguran una liberación de nutrientes a largo plazo, y por tanto mayor fertilidad del suelo. Menor respuesta de la microbiota (C menos lábil).



- Biomasa microbiana ↑
- Actividad microbiana ↑
- Fertilidad → CO, N ↑
- Descomposición rápida → *Estiércol porcino*
- Menor respuesta microbiana

	CO (%)	N (%)
Verde	3.99 bc	0.31 ab
Quemado	3.27 a	0.27 a
Paja	3.66 ab	0.26 a
Compost	5.19 d	0.54 d
Guano	4.73 cd	0.47 c
Porcino	4.14 bc	0.36 b

# MANEJOS POST-INCENDIO EN ECOSISTEMAS MEDITERRÁNEOS

## Tala y Saca de madera



- Amenaza a la biodiversidad
- Diversificación extracción

## Mulch madera



- Frenar erosión!
- Amenaza a la biodiversidad?

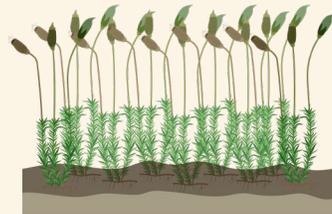
## Enmiendas orgánicas



- Objetivos de la restauración
- Islas de fertilidad

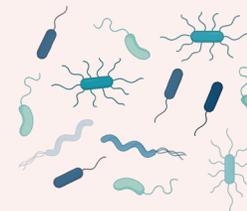
## Biocostras dominadas por musgos

- Papel relevante en el post-incendio
- Incluir en la gestión forestal



## Comunidades microbianas del suelo

- Diversidad microbiana gran indicador
- Homogenización como amenaza a la diversidad microbiana
- Más esfuerzo de medición



## CONCLUSIONES

- 1.** Los musgos formadores de biocostras juegan un papel importante en la recuperación de múltiples funciones del suelo en ecosistemas post-incendio. El estado de desarrollo de la biocostra controla el efecto en los suelos.
- 2.** La tala y saca de madera y el mulch de madera afecta negativamente al desarrollo de la biocostra.
- 3.** Tala y saca de madera en suelos altamente erosionables alteran profundamente las comunidades microbianas, siendo la degradación de la estructura del suelo el principal motivo del cambio. El mantenimiento de la madera quemada promueve el desarrollo microbiano.
- 4.** Bajo la aplicación de mulch basado en madera las comunidades microbianas se vuelven transitoriamente homogéneas y menos diversas.
- 5.** Las enmiendas orgánicas tienen respuestas contrastadas en los suelos dependiendo de su origen y estabilidad. La selección depende de los objetivos últimos de la restauración.
- 6.** Planes post-incendio deben incorporar la protección y promoción de la diversidad microbiana y los musgos formadores de biocostras.

# Role of biological soil crust and soil microbial communities in the recovery of burned soils exposed to post-fire management

---

*El papel de las costras biológicas y comunidades microbianas edáficas en la recuperación de suelos quemados sometidos a manejos post-incendio*

