



Informe de Resultados

Análisis Metagenómico de Suelos de Césped Deportivo

Asunto: Validación y Optimización del Manejo Ecológico en Campos de Golf

8 de septiembre de 2025

Estimado **José Muñoz**,

Comprendemos que su experiencia en el manejo 100% ecológico ya le ha demostrado la resiliencia y salud superior de su césped. La baja incidencia de patógenos y la notable tolerancia al estrés térmico e hídrico que usted observa no son una casualidad.

El objetivo de este informe es ponerles ciencia a sus resultados. Mediante el análisis metagenómico, hemos mirado a nivel molecular de su suelo para identificar los mecanismos biológicos que impulsan la calidad de su césped. Estos datos no solo validan su estrategia de manejo, sino que también ofrecen una nueva visión para optimizarla con un soporte técnico-científico que dará una precisión aún mayor.

El ADN del Suelo: Dos Agrosistemas Claramente Definidos

El primer resultado fundamental que arroja el análisis estadístico (**Figura 1 y 2**) es la marcada diferencia entre los microorganismos que conforman los microbiomas del manejo ecológico y convencional. Los suelos bajo el manejo ecológico (muestras etiquetadas como S2 y S3) forman un grupo similar y funcionalmente distinto, el cual claramente se separa del microbioma del suelo del manejo convencional (etiquetado como S1).

Esta separación que muestra el gráfico es la primera evidencia sólida de las diferencias que sus prácticas ecológicas han impactado, principalmente, **seleccionando y cultivando con éxito un consorcio microbiano único**, lo que podría considerarse como una firma biológica adaptada a su filosofía de manejo.

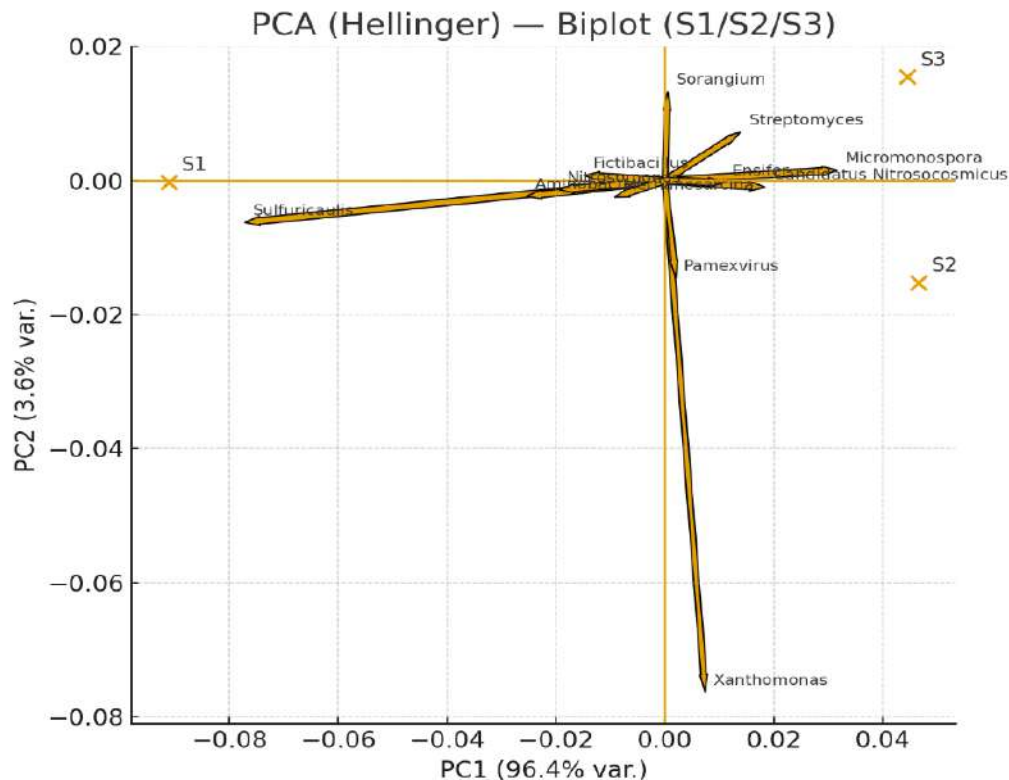


Figura 1. Mapa de diferenciación de las comunidades microbianas (PCA). El análisis visualiza el "ADN microbiano" de cada suelo, evidenciando una clara y contundente separación entre los modelos de manejo. El eje principal horizontal (PC1), captura el **96,4 % de la varianza**, segrega el suelo de manejo convencional (S1, izquierda) de los suelos bajo su manejo ecológico (S2 y S3, derecha). Los vectores (flechas) señalan los géneros microbianos que son los principales arquitectos de esta diferencia. **Streptomyces** forma parte del núcleo compartido; en ecológico destaca acompañado por **Micromonospora** y otros géneros asociados al reciclaje de materia orgánica. En contraste, **Sulfuricaulis** se asocia fuertemente con el sistema convencional, el cual está relacionado con el aumento de azufre en suelo lo que afecta el metabolismo de otros microorganismos y la salud de las raíces. En esencia, este gráfico es la validación visual de que su estrategia ha cultivado con éxito un ecosistema microbiano funcionalmente distintivo y consistente.

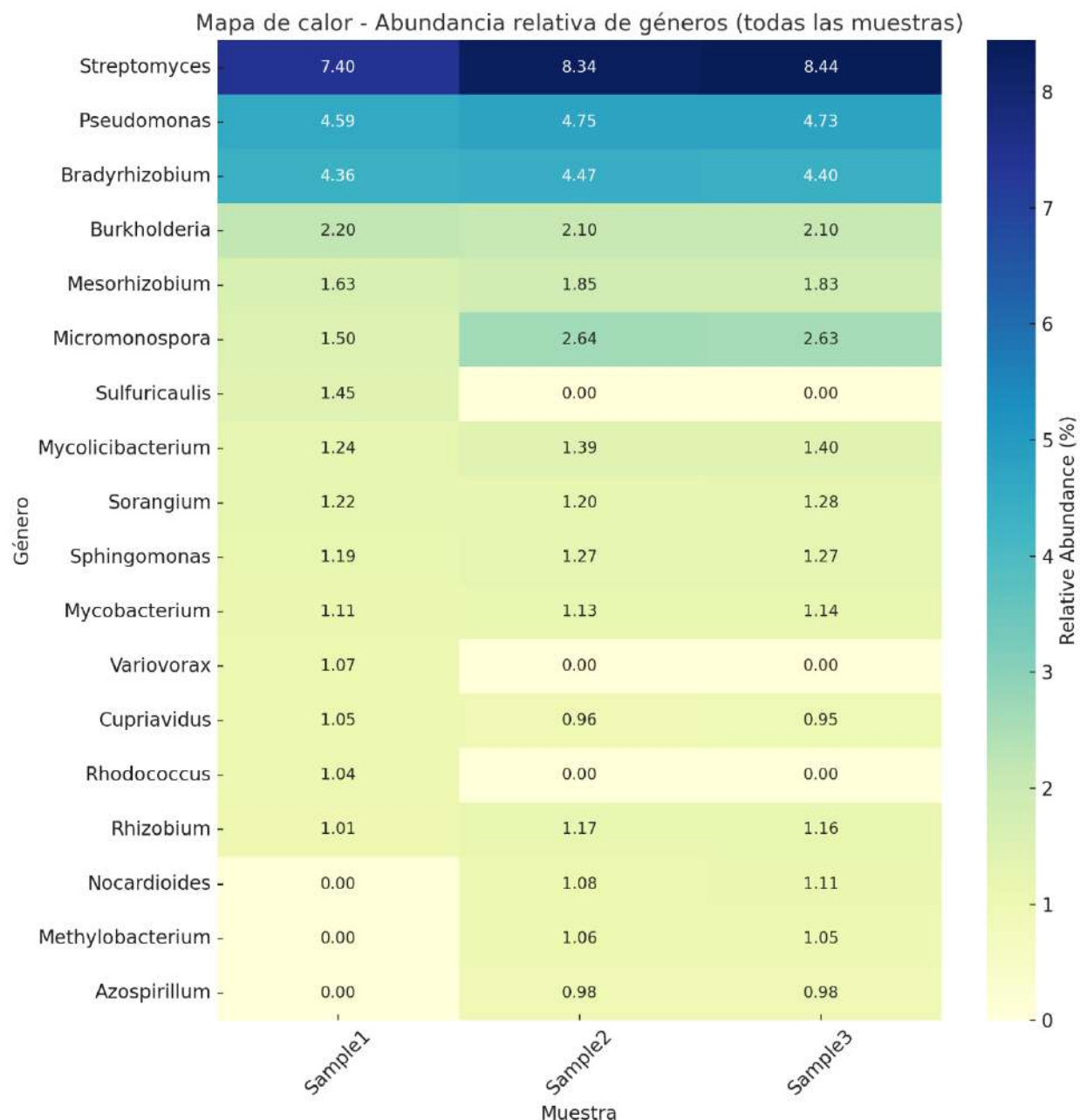


Figura 2. Abundancia Relativa de los Géneros Microbianos Dominantes. Este mapa de calor ofrece una visión detallada de los géneros clave que definen la estructura de la comunidad microbiana en cada muestra (Convencional: Sample1; Ecológico Sample 2 y Sample 3), permitiendo una comparación directa de sus abundancias relativas (normalizadas). El análisis visual confirma un doble patrón: (1) **Un Núcleo Microbiano Estable:** Se observa un grupo de géneros dominantes y resilientes presentes en los tres sistemas, liderado por ***Streptomyces***, ***Pseudomonas*** y ***Bradyrhizobium***. Esto sugiere la existencia de una base microbiana fundamental y adaptada a las condiciones generales del césped. (2) **Una Clara Firma por Manejo:** Superpuesto a este núcleo, el mapa revela un reemplazo de nichos ecológicos: **Indicadores Ecológicos:** El género ***Micromonospora***, reconocido por su capacidad para descomponer materia orgánica, se observa

mayor abundancia relativa en sus suelos ecológicos (Sample2 y Sample3), actuando como un claro bioindicador positivo de su estrategia de manejo. **Indicadores Convencionales:** Por otro lado, un consorcio de géneros que incluye a ***Sulfuricaulis***, ***Variovorax*** y ***Rhodococcus*** conforman una firma característica del sistema convencional (Sample1), cuya relevancia disminuye drásticamente bajo las prácticas ecológicas.

Tabla 1. Top 15 de los principales géneros de cada una de las muestras.

Orden de abundancia	S1	S2	S3
1	Streptomyces	Streptomyces	Streptomyces
2	Pseudomonas	Pseudomonas	Pseudomonas
3	Bradyrhizobium	Bradyrhizobium	Bradyrhizobium
4	Burkholderia	Micromonospora	Micromonospora
5	Mesorhizobium	Burkholderia	Burkholderia
6	Micromonospora	Mesorhizobium	Mesorhizobium
7	Sulfuricaulis	Mycolicibacterium	Mycolicibacterium
8	Mycolicibacterium	Sphingomonas	Sorangium
9	Sorangium	Sorangium	Sphingomonas
10	Sphingomonas	Rhizobium	Rhizobium
11	Mycobacterium	Mycobacterium	Mycobacterium
12	Variovorax	Nocardioides	Nocardioides
13	Cupriavidus	Methylobacterium	Methylobacterium
14	Rhodococcus	Azospirillum	Azospirillum
15	Rhizobium	Cupriavidus	Cupriavidus

Anatomía del Éxito: Los Motores Biológicos de su Suelo Ecológico

Su observación general de un césped resiliente se logra explicar y fundamentar por una serie de rutas metabólicas enriquecidas en los microbiomas de sus suelos (S2 y S3). La comunidad microbiana de su manejo ecológico no sólo sobrevive, sino que gestiona activamente el entorno para favorecer la salud del césped (**Figuras 3, 4, 5 y 6**).

Ciclos de Nutrientes Optimizados:

- **Azufre y Nitrógeno:** Hemos detectado una alta actividad en genes de **oxidación de azufre (sox, sqr)** y **nitrificación (amo, hao)** (**Fig. 3 y 4**). En términos prácticos, su microbioma está convirtiendo eficientemente nutrientes bloqueados en el suelo a formas directamente asimilables por la planta (sulfatos y nitratos). Esto crea un sistema de fertilización interna, estable y de liberación lenta, reduciendo la dependencia de insumos.
- **Materia Orgánica:** La capacidad mejorada para degradar compuestos complejos como la **lignina y la celulosa** indica que su suelo es un reciclador experto, transformando los recortes y raíces muertas en un flujo constante de carbono y nutrientes para todo el agroecosistema, lo cual impacta en un potencial aumento de la actividad microbiana.

Sistema de Defensa y Adquisición de Nutrientes (Sideróforos):

- Esta es, quizás, la clave de la resiliencia en su suelo alcalino. La alta abundancia de genes para la producción de **sideróforos** (impulsada por géneros como *Pseudomonas* y *Streptomyces*) desempeña un doble papel crítico:
 1. **Nutrición:** Actúan como un servicio de quelación (secuestro) a medida, capturando hierro y otros micronutrientes bloqueados por el pH y dejándolos biodisponibles para las raíces del césped.
 2. **Biocontrol:** Al secuestrar el hierro disponible en la rizosfera, limitan el uso de este nutriente esencial por patógenos fúngicos y bacterianos, lo que limita su crecimiento y prevalencia en el suelo. Esto es, en esencia, una "guerra biológica" por los recursos que protege activamente a su césped y explica la baja incidencia de enfermedades que usted reporta.

Mecanismos de Tolerancia al Estrés:

- El enriquecimiento de rutas de **osmoprotección** dota a la comunidad microbiana del manejo ecológico, de una mayor capacidad para soportar fluctuaciones de humedad y salinidad. Esta resiliencia microbiana se transfiere directamente al césped, explicando su robusta respuesta al estrés hídrico.

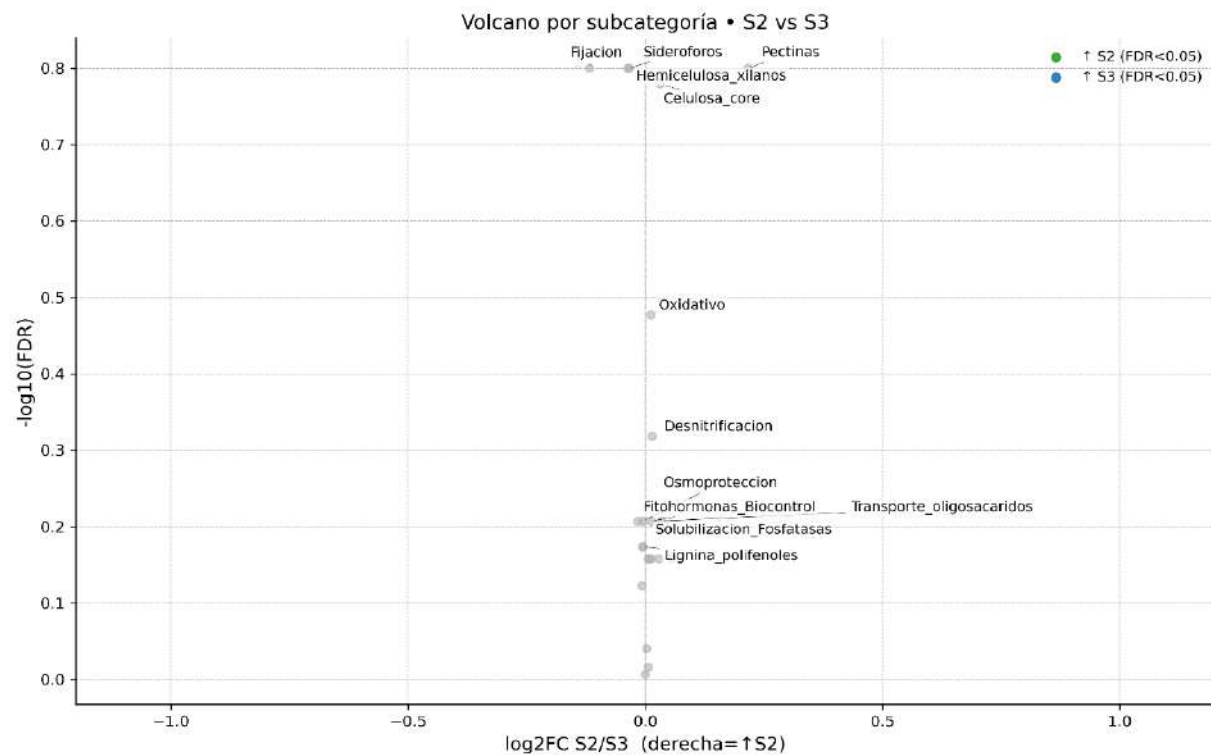


Figura 3. Comparación funcional entre los suelos con manejo ecológico (S2 vs S3). Este análisis demuestra la alta consistencia y homogeneidad funcional entre sus dos campos de manejo ecológico. La gran mayoría de las rutas metabólicas se sitúan en la línea central, indicando que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ambas. Este resultado es clave, pues confirma que su estrategia de manejo produce un **modelo biológico estable y que tiende a replicarse**, fundamentando que no es un resultado aleatorio. La similitud funcional es la base de un rendimiento predecible y fiable.

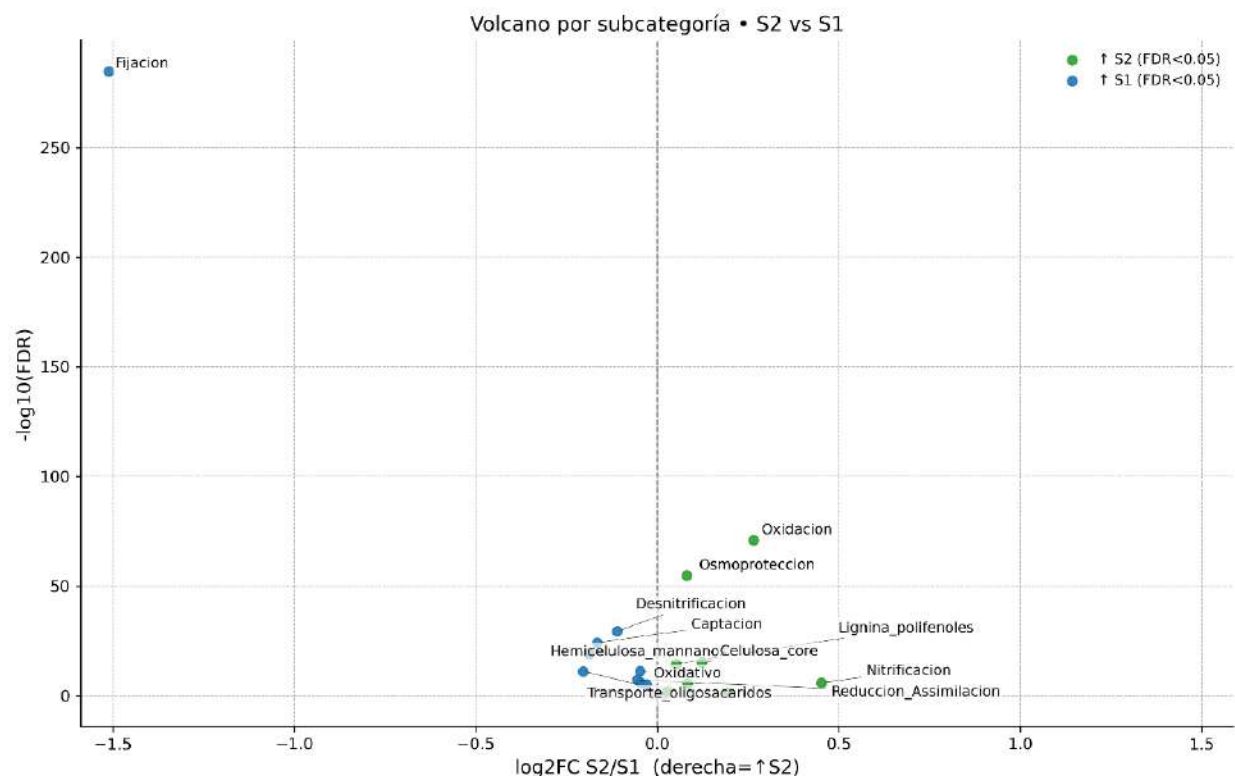


Figura 4. Confirmación del perfil metabólico: Manejo ecológico (S2) vs. Convencional (S1). Este segundo análisis corrobora de manera idéntica el patrón funcional observado anteriormente, reforzando la validez de los hallazgos. Nuevamente, el suelo convencional (S1, izquierda) se especializa de forma marcada en la **fijación de N**, mientras que su suelo de manejo ecológico (S2, derecha) presenta un perfil metabólico superior en las mismas rutas de resiliencia: **oxidación, osmoprotección** y reciclaje de materia orgánica (degradación de **lignina y celulosa**) Este resultado subraya que el perfil funcional avanzado de los suelos con su manejo **no es un hecho aislado en una muestra, sino una característica consistente y reproducible** de su estrategia de manejo ecológico.

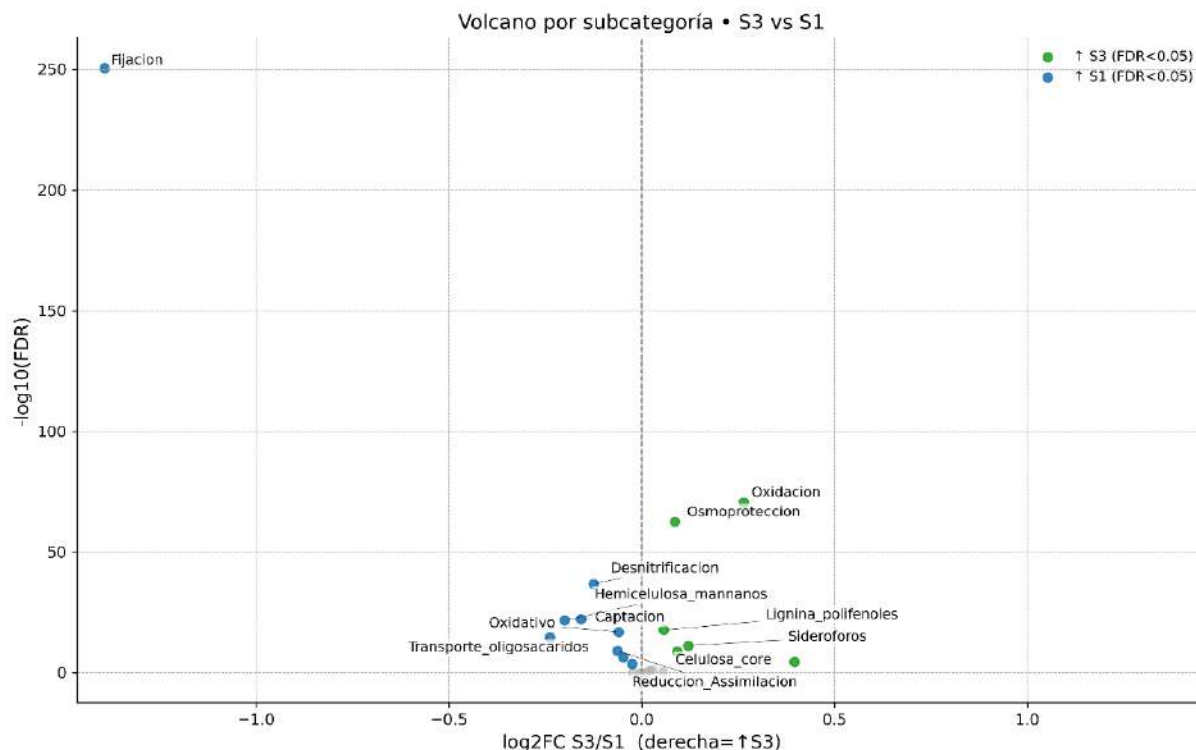


Figura 5. Contraste funcional: Manejo ecológico (S3) vs. Convencional (S1). Aquí se visualizan las profundas diferencias en la "estrategia" metabólica de cada sistema. **A la izquierda (azul):** Se observa cómo el sistema convencional (S1) concentra su actividad de forma principal en la **fijación de nitrógeno**, un proceso de alta ganancia, pero, como ya hemos comentado, con potenciales pérdidas. **A la derecha (verde):** Su suelo con manejo ecológico (S3) muestra una diferencia estadística en un conjunto diverso de funciones clave para la resiliencia y autosuficiencia. Destacan la **oxidación** (de azufre, para disponibilidad de nutrientes), la **osmoprotección** (tolerancia al estrés hídrico), la degradación de **lignina** (reciclaje de materia orgánica) y la producción de **sideróforos** (nutrición de hierro y biocontrol). *Este gráfico ilustra con claridad el cambio de un modelo basado en una sola función dominante a un sistema multifuncional e integrado.*

Integración de Datos: Cómo la Biología Compensa los Desafíos del Terreno

El análisis químico confirma que su suelo es, por naturaleza, un entorno desafiante: una textura arenosa con baja retención y un pH alcalino que tiende a inmovilizar nutrientes. El análisis metagenómico revela cómo su manejo ha promovido una biología que no solo sobrevive a estas condiciones, sino que las aprovecha.

- **El Desafío (Química):** pH de 8.16 y 96% de arena, que limitan la disponibilidad de Fe, Zn, Mn y la retención de agua.

- **La Solución con un manejo ecológico (Metagenómica):** Un microbioma enriquecido en **sideróforos**, genes de **osmoprotección** y rutas de **mineralización** eficientes.
- **El Resultado (Observación Práctica):** Un césped con mayor biodisponibilidad de micronutrientes, alta tolerancia a la sequía y menor necesidad de fertilización externa. Su microbioma está, de hecho, reacondicionando el entorno a microescala para crear un suelo óptimo para el establecimiento de microorganismos y cultivos (Fig. 6).

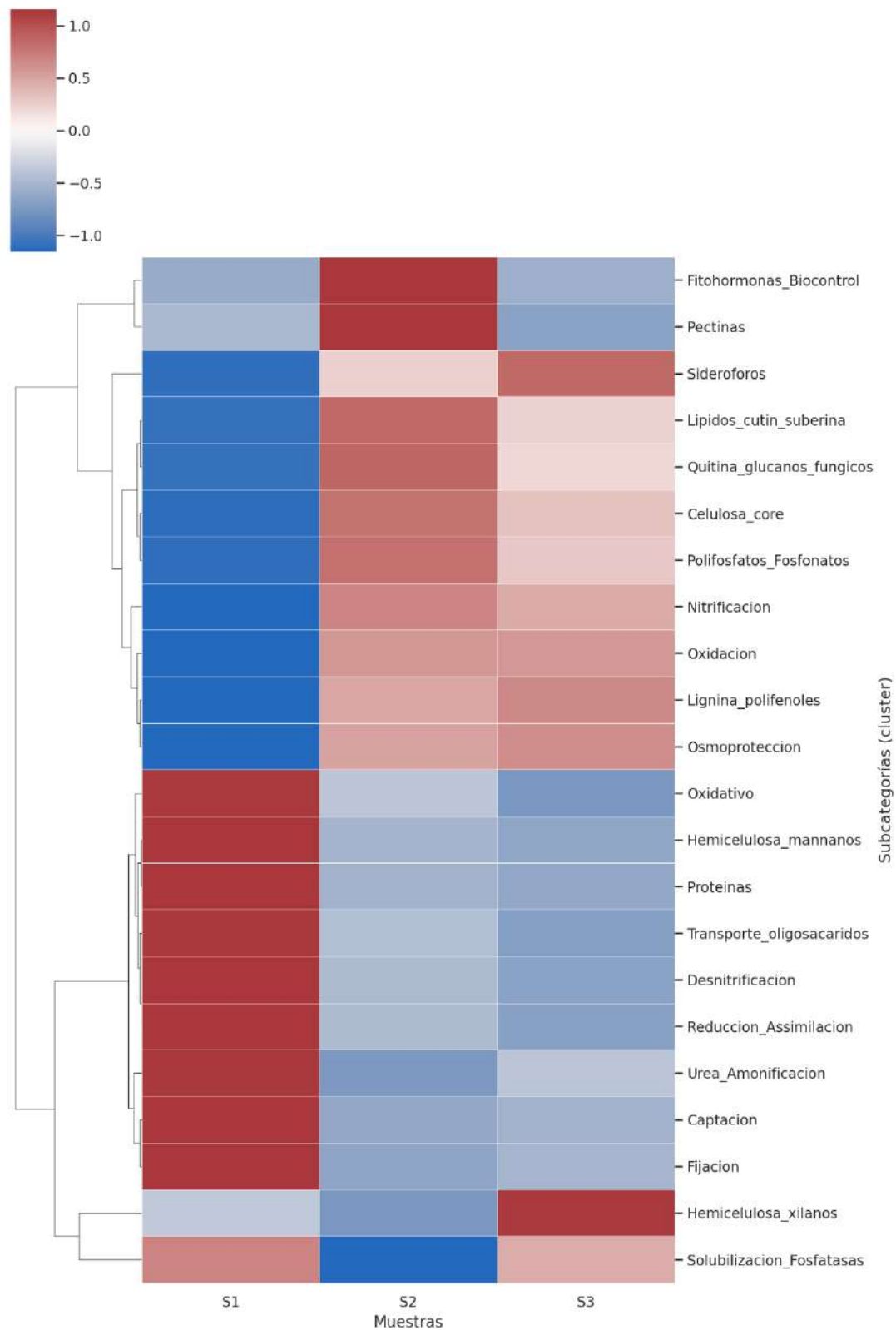
Recomendaciones Estratégicas para la Optimización

El sistema que ha construido es robusto y eficiente. Con base en los nuevos hallazgos, se sugieren las siguientes recomendaciones para potenciar los mecanismos biológicos ya establecidos:

1. **Sostener el Aporte de Materia Orgánica de Calidad:** Las aplicaciones de topdressing orgánico o compost maduro son la forma más directa de "alimentar" a las comunidades microbianas (ej. *Streptomyces*, *Micromonospora*) responsables del reciclaje de nutrientes y la producción de sideróforos. Los datos sugieren que su sistema responde eficientemente a esta práctica.
2. **Nutrición de Precisión con Soporte Biológico:** Cuando sea necesario un aporte suplementario de nutrientes (particularmente fósforo o micronutrientes), considere formulaciones que incluyan consorcios microbianos o bioestimulantes. Esto asegura que los nutrientes aplicados no sean bloqueados por la química del suelo y sean eficientemente ciclados por la biología que ya ha fomentado.

Figura 6. Perfil funcional y Módulos Metabólicos por Tipo de Manejo. Este mapa de calor compara la abundancia relativa de las funciones metabólicas clave (rojo = alta, azul = baja) y, lo que es más importante, las agrupa según su comportamiento a través de las muestras. El análisis revela la existencia de "módulos funcionales" coherentes que definen cada sistema. Se identifica un claro **módulo ecológico** (agrupación superior) prominentemente activo en sus muestras (S2 y S3). Este módulo integra procesos sinérgicos cruciales para la salud del suelo: la producción de **sideróforos**, el **biocontrol**, el reciclaje de materia orgánica compleja (**lignina, celulosa**), un ciclo de nitrógeno eficiente (**nitrificación**) y la tolerancia al estrés (**osmoprotección**). En contraposición, se define un **módulo convencional** (agrupación inferior), dominante casi en exclusiva en S1. Este se centra en un ciclo de nitrógeno de alta intensidad y rotación, con fuerte actividad de **fijación**, pero también de procesos de pérdida como la **desnitrificación**. Este análisis no solo confirma *qué* funciones son diferentes, sino que demuestra cómo sus prácticas ecológicas han fomentado un

conjunto de capacidades interconectadas que trabajan en sinergia para construir un suelo resiliente y funcionalmente diverso.



Conclusión

Con los datos obtenidos de los microbiomas de suelo se muestra que la estrategia de manejo ecológico ha generado un agroecosistema a nivel del suelo con mejor calidad nutricional y microbiana. Los datos de este informe proporcionan la validación científica de las observaciones de campo, demostrando que la resiliencia y salud de su césped son el resultado directo de una comunidad microbiana funcionalmente diversa y altamente especializada. Este análisis proporciona una comprensión más profunda de los activos biológicos y su capacidad en los suelos con un manejo agroecológico.

Metodología

Para elaborar este informe realizamos un análisis metagenómico profundo de las tres muestras de suelo (S1 convencional, S2 y S3 ecológicos). El flujo de trabajo incluyó:

- **Extracción de ADN y secuenciación shotgun** de alto rendimiento para capturar la totalidad del material genético presente en el suelo.
- **Procesamiento bioinformático** con herramientas de referencia internacional, que permiten identificar tanto la composición taxonómica (qué microorganismos hay) como el potencial funcional (qué genes y rutas metabólicas aportan).
- **Bases de datos especializadas** en ciclos biogeoquímicos (nitrógeno, azufre, fósforo, carbono) y en enzimas clave, lo que nos permite vincular funciones agrícolas relevantes con los microorganismos responsables.
- **Normalización y análisis estadístico** para comparar directamente los tres suelos, identificar patrones de abundancia y resaltar diferencias significativas entre el manejo convencional y el ecológico.

Este enfoque proporciona un panorama completo del “ADN microbiano” de los suelos, asegurando resultados confiables y reproducibles.

Perspectivas Futuras

Los resultados aquí presentados ofrecen una fotografía robusta y clara del potencial biológico de sus suelos. A partir de esta base, se abren oportunidades para:

- **Monitoreo periódico:** realizar análisis metagenómicos en intervalos definidos para observar tendencias a lo largo del tiempo (ej. cada año) y evaluar la estabilidad del microbioma.
- **Validación con indicadores rápidos:** a futuro, es posible desarrollar pruebas moleculares específicas (por ejemplo, PCR cuantitativa) que midan de forma directa los biomarcadores más relevantes encontrados en este estudio.
- **Optimización del manejo:** integrar la información biológica con datos químicos y agronómicos, reforzando decisiones de nutrición, riego y manejo del césped.

De esta manera, el presente análisis no solo valida sus resultados actuales, sino que sienta las bases para un sistema de gestión continua, de precisión y con respaldo científico.