

APLICACIÓN DE UNA ENMIENDA ORGÁNICO-MINERAL EN VIÑEDOS

para mejorar la calidad del suelo y su sostenibilidad

En este estudio se propone el uso de compost orgánico-mineral basado en sustrato postcultivo del champiñón (SPCH) y polvo de ofita (OF) para aumentar el contenido de materia orgánica y mejorar la remineralización del suelo. La aplicación de estas enmiendas podría ser beneficiosa para los suelos de viñedos en La Rioja, que han experimentado una pérdida considerable de calidad. Se espera que esta práctica contribuya a la economía circular al utilizar residuos generados localmente. Los objetivos de este estudio incluyen evaluar los cambios en las propiedades físicoquímicas del suelo después de la aplicación de SPCH o SPCH + OF y sobre la sostenibilidad de los viñedos.

M. SOLEDAD ANDRADES RODRÍGUEZ¹, ELISEO HERRERO-HERNÁNDEZ^{2*}, GONZALO VILLALBA EGUREN³, JESÚS M. MARÍN-BENITO⁴, M. SONIA RODRÍGUEZ-CRUZ⁴

¹ Universidad de La Rioja

² Universidad de Salamanca *elihh@usal.es

³ AGROVIDAR. S.L.

⁴ Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca (IRNASA-CSIC)

La creciente necesidad de adoptar prácticas agrícolas sostenibles surge debido a los riesgos potenciales asociados con la agricultura intensiva a largo plazo, tales como la degradación del suelo, el estancamiento del desarrollo agrícola y las amenazas a la seguridad alimentaria (Amoah-Antwi *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022). Se pueden abordar estos desafíos de manera efectiva mediante la aplicación de enmiendas orgánicas, las cuales aumentan el contenido de materia orgánica (MO) y conservan la fertilidad y calidad del suelo. (Bonanomi *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022; El-Naggar *et al.*, 2019; Ibrahim *et al.*, 2022).

El sustrato postcultivo de champiñón (SPCH) constituye un residuo orgánico derivado de la producción de champiñones comestibles cuya producción crece a nivel mundial. El compostaje de este residuo aparece como una opción viable y valiosa para mejorar la sostenibilidad de la agricultura (Kit-Leong *et al.*, 2022; Umor *et al.*, 2021). Esta práctica enriquece el suelo con MO y nutrientes, fortaleciendo su estructura y capacidad productiva (Joniec *et al.*, 2022; Swoboda *et al.*, 2022).

Paralelamente, la extracción de nutrientes minerales con cada cosecha exige su reposición para evitar el agotamiento del suelo y mejorar su calidad. En este sentido, la aplicación de polvo

de roca se considera una alternativa natural para la remineralización del suelo (Cunha *et al.*, 2022), aportando nutrientes y mejorando propiedades como el intercambio catiónico y el pH (Swoboda *et al.*, 2022). Distintos estudios han demostrado rendimientos superiores en plantas tratadas con polvo de roca en comparación con la fertilización convencional, especialmente en cultivos de ciclo largo (Basak *et al.*, 2021; Cunha *et al.*, 2022). Además, combinar estos productos con residuos orgánicos puede potenciar su efectividad, aunque el éxito de esta mezcla depende de las características de los materiales involucrados (Basak *et al.*, 2021; Meena y Biswas, 2014; García-Gómez *et al.*, 2002).



Distribución de la enmienda orgánica de SPCH

La investigación sobre el compost mixto orgánico-mineral en suelos agrícolas aún es escasa. Por ello, este estudio incluye un nuevo tipo de compost que combina MO y minerales, utilizando SPCH y roca subvolcánica ofita (OF), con el fin de mejorar la calidad del suelo y promover su remineralización.

La Rioja produce una cantidad significativa de SPCH, con una producción de champiñones que supera los 70 millones de toneladas anuales. La utilización del SPCH como enmienda del suelo, así como el compost elaborado a partir de este sustrato combinado con la ofita (SPCH + OF), podrían ser prácticas prometedoras para mejorar los suelos agrícolas de la región, en la línea de los principios de la economía circular (Breure *et al.*, 2018). Específicamente, los suelos de los viñedos en La Rioja muestran niveles bajos de MO y una calidad mejorable, y estos hechos influyen en la producción de uvas y la sostenibilidad de los viñedos (Calleja-Cervantes *et al.*, 2015a, 2015b; Pérez-Álvarez *et al.*, 2013). Con el propósito de mejorar la calidad de los suelos de viñedos, este estudio se centra en investigar los cambios en las propiedades fisicoquímicas del

Este estudio incluye un compost que combina MO y minerales, utilizando SPCH y roca subvolcánica ofita, con el fin de mejorar la calidad del suelo

suelo tras la aplicación de SPCH o SPCH + OF en dos suelos con diferente textura durante un periodo de dos años en condiciones de campo. Además, se analizarán los efectos de ambas enmiendas aplicadas en dos dosis como una práctica potencial de manejo agronómico para fomentar la sostenibilidad de los viñedos

Materiales y métodos

-Sustrato postcultivo de champiñón y ofita

El sustrato postcultivo de champiñón (SPCH), originado tras el cultivo y la producción de *Agaricus bisporus* en La Rioja, fue sometido a un proceso de recompostaje aeróbico durante tres meses. Por otro lado, la ofita (OF) es una roca ígnea subvolcánica compuesta por una variedad de metales y una concentración moderada a baja de epidota, cuarzo y montmorillonita-clorita. Esta roca se empleó como polvo mineral para la remineralización del suelo. Posteriormente el SPCH fue mezclado con la OF en una proporción de OF del 15% y se sometió a un proceso de recompostaje adicional durante un mes. Las características del SPCH, OF y SPCH + OF se determinaron siguiendo los procedimientos descritos por Marín-Benito *et al.* (2009) y Sparks (1996) (Tabla 1).

- Diseño experimental, muestreo de suelo y análisis estadístico

• Diseño experimental

El trabajo de campo se llevó a cabo en los años 2020 y 2021 en dos viñedos, denominados S1 y S2, ubicados en

la subzona Rioja Oriental (D.O. Ca Rioja).

El diseño experimental se basó en un bloque completo al azar, con cinco tratamientos y tres repeticiones por tratamiento, lo que resultó un total de 15 parcelas de 3 m × 3 m. Los tratamientos incluyeron suelo sin enmiendas, suelo enmendado con SPCH a tasas de 25 y 100 Mg ha⁻¹ (S + SPCH25 y S + SPCH100, respectivamente), y suelo enmendado con 25 y 100 Mg ha⁻¹ de SPCH + OF al 15% (S + SPCH25+OF, S + SPCH100+OF) basado en peso seco. Estas tasas equivalen a la aplicación de 5 y 20 g de C por kg de suelo, respectivamente. Previamente a la aplicación de las enmiendas, el suelo se labró con un cultivador de campo y luego se mezcló el SPCH o SPCH + OF con la capa superficial del suelo (0-30 cm) en cada parcela utilizando un rotavator. El estudio se llevó a cabo desde marzo hasta octubre, periodo durante el cual el suelo se mantuvo libre de vegetación y no se aplicó fertilización adicional.

Los residuos de SPCH y SPCH + OF se aplicaron dos veces, en marzo de 2020 y 2021, y se tomaron muestras de suelo un mes después de cada aplicación de SPCH (abril de 2020 y 2021) y siete meses después, una vez finalizada la vendimia (octubre de 2020 y 2021). Se recolectaron cinco muestras de suelo en cada parcela, a una profundidad de 0-30 cm.

• Análisis físico químicos de los suelos

Los parámetros físico-químicos del suelo se determinaron siguiendo los procedimientos descritos por Marín-Benito *et al.* (2009) y Sparks (1996) (Tabla 1).

• Análisis estadístico

Las muestras se tomaron de las parcelas triplicadas y los resultados se presentan como la media de tres repeticiones. Se obtuvo una matriz de correlación de Pearson con las características físico-químicas del suelo y se evaluó la influencia del tratamiento del suelo y los tiempos de muestreo mediante un análisis de varianza de

TABLA 1

Características del sustrato postcultivo del champiñón (SPCH), ofita (OF) y suelos no enmendados (S1 y S2) determinados sobre el peso seco.

PARAMETROS	SPCH	OF	SPCH+OF	S1	S2
Textura	-	-	-	Franco limoso	Franco arenoso
Arena (%)	-	-	-	27.3±4.99	48.7±4.71
Limo (%)	-	-	-	50.2±2.30	31.6±2.99
Arcilla (%)	-	-	-	22.5±2.84	19.7±3.67
pH	7.60±0.04	8.37±0.34	7.48±0.01	8.09±0.06	8.50±0.11
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	10.9±0.08	0.25±0.00	10.6±0.27	0.74±0.03	0.16±0.02
CaCO ₃ (%)	14.6±0.27	2.38±0.14	10.7±0.33	17.6±0.78	17.0±1.75
Materia orgánica (%)	41.9±0.34	0.09±0.04	31.2±0.68	1.42±0.10	0.98±0.19
Carbono orgánico (%)	24.3±0.20	0.05±0.02	18.1±0.39	0.82±0.06	0.57±0.11
N total (%)	2.05±0.00	0.02±0.00	1.67±0.03	0.12±0.02	0.10±0.00
C/N	11.9±0.09	3.21±1.55	10.8±0.07	7.22±1.03	6.50±1.04
CIC (cmol+ kg ⁻¹)	42.9±1.01	1.66±0.03	32.9±1.84	6.56±0.12	5.01±1.13
NH ₄ ⁺ -N (mg kg ⁻¹)	298±2.97	5.51±3.25	31.9±5.33	6.43±0.06	0.90±0.00
NO ₃ ⁻ -N (mg kg ⁻¹)	587±8.69	88.8±5.89	673±13.6	214±15.0	46.3±2.20
P disponible (g kg ⁻¹)	1.14±0.06	0.00±0.00	1.01±0.16	0.04±0.01	0.02±0.00
Ca disponible (g kg ⁻¹)	28.5±0.08	5.97±0.31	31.9±0.99	13.1±0.51	14.3±0.66
K disponible (g kg ⁻¹)	18.1±0.08	0.04±0.00	14.4±0.19	0.63±0.01	0.32±0.02
Mg disponible (g kg ⁻¹)	3.64±0.01	0.18±0.01	3.17±0.06	0.28±0.04	0.11±0.01
Cu disponible (mg kg ⁻¹)	1.43±0.04	0.29±0.00	1.41±0.05	0.24±0.11	0.27±0.05
Fe disponible (mg kg ⁻¹)	14.5±1.36	1.81±0.30	17.2±0.33	1.83±0.08	1.38±0.05
Mn disponible (mg kg ⁻¹)	28.7±0.76	8.38±0.35	14.7±0.19	10.6±0.56	2.69±0.17
Zn disponible (mg kg ⁻¹)	9.61±0.18	0.20±0.00	7.94±0.20	0.06±0.00	0.06±0.00

dos vías (ANOVA). Para estos análisis se utilizó el paquete de software IBM SPSS Statistics v26.3.

Resultados y discusión

- Cambios en el pH del suelo

Los niveles de pH del suelo registrados fueron de 8,09 (S1) y 8,50 (S2) antes de la primera aplicación de enmiendas (Tabla 1). La utilización de SPCH y SPCH + OF en general provocó una disminución del pH en ambos suelos con el transcurso del tiempo. En S1, que tiene una textura franco limosa, se observó una disminución del pH después de la aplicación de la dosis alta de SPCH, mientras que en S2, con una textura franco arenosa, se observó una reducción significativa después de ambas dosis de SPCH ($p \leq 0,05$). Los valores de pH se recuperaron siete meses después de la primera aplicación de SPCH, aunque en S2 la dosis alta

de SPCH obstaculizó parcialmente esta recuperación. Los cambios en el pH tras la segunda aplicación de enmiendas fueron similares, aunque la recuperación del pH con el tiempo ocurrió en S2, pero no en S1, especialmente en presencia de SPCH + OF (Figuras 1A y 1B).

La descomposición microbiana del SPCH podría influir en estos cambios y manifestarse después de aplicaciones repetidas, aunque este efecto fue distinto en los dos tipos de suelo. Además, la producción de ácidos orgánicos durante la mineralización de materiales orgánicos también podría afectar la disminución del pH del suelo. Distintos estudios encontrados en la bibliografía avalan estos resultados, e indican que las variaciones del pH del suelo con el tiempo, dependen del pH inicial, la naturaleza y la cantidad de los residuos orgánicos aplicados, así como de la capacidad de amortiguación del suelo.

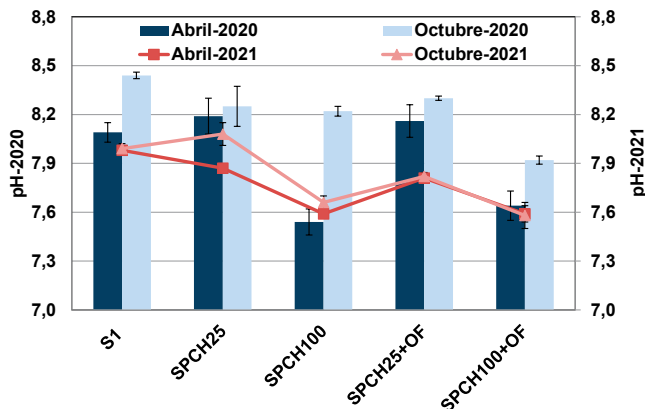


FIGURA 1A
Evolución del pH en el suelo S1 (testigo) y del mismo suelo con los distintos tratamientos orgánicos y minerales.

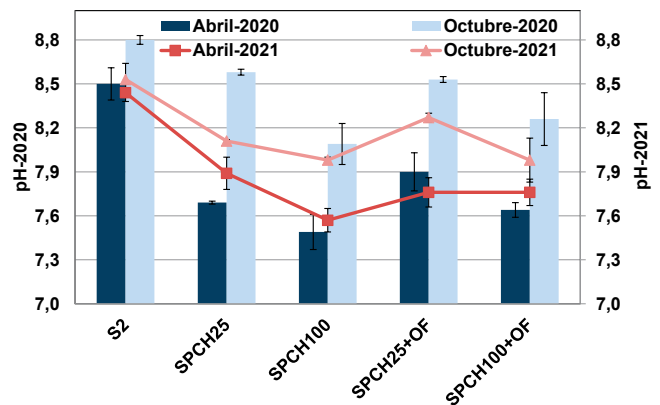


FIGURA 1B
Evolución del pH en el suelo S2 (testigo) y del mismo suelo con los distintos tratamientos orgánicos y minerales.

- Cambios en el contenido en carbono orgánico (CO)

El contenido de CO en los suelos sin enmendar fue medido antes de la aplicación de las enmiendas, siendo de 0,82% en el suelo S1 y de 0,57% en el suelo S2 (Tabla 1). Tras la aplicación de SPCH a dosis de 25 y 100 Mg ha⁻¹, los niveles de CO aumentaron significativamente en ambos suelos, alcanzando valores entre 0,82%-3,98% en S1 y 0,57%-3,92% en S2 después de un mes. Este incremento se atribuyó al alto contenido de CO presente en el SPCH aplicado, que enriqueció el suelo con MO (Figura 2A y 2B). Estos valores fueron menores cuando se aplicó SPCH+OF que cuando se

aplicó sólo SPCH debido a su menor contenido en CO.

Sin embargo, se observó una disminución en el contenido de CO con el tiempo después de las dos aplicaciones debido a la mineralización de los residuos orgánicos presentes en el SPCH. Sin embargo, el contenido residual de CO siete meses después de la segunda aplicación siempre aumentó con respecto al contenido inicial de CO de los suelos no enmendados (hasta 3,4 veces en S1 y hasta 2.8 veces en S2) tras la aplicación de la dosis alta de SPCH.

Es interesante destacar que el contenido de CO varió dependiendo de la textura del suelo. En el suelo franco

limoso S1, se observó un aumento inicial entre 1,1 y 2,3 veces en el CO seguido de una disminución con el tiempo después de la segunda aplicación de residuos. Sin embargo, esta retención de CO no se observó en general en el suelo arenoso (S2), indicando la influencia de la textura del suelo en el posible secuestro del CO aportado por el SMS y su evolución en el tiempo. Por lo tanto, la aplicación continua de residuos en S2 sería necesaria para mantener el contenido de CO, mientras que en S1 podría obtenerse un aumento continuo del contenido de CO tras la aplicación repetida de SMS. Morlat y Chaussod (2008) observaron un aumento sostenido en

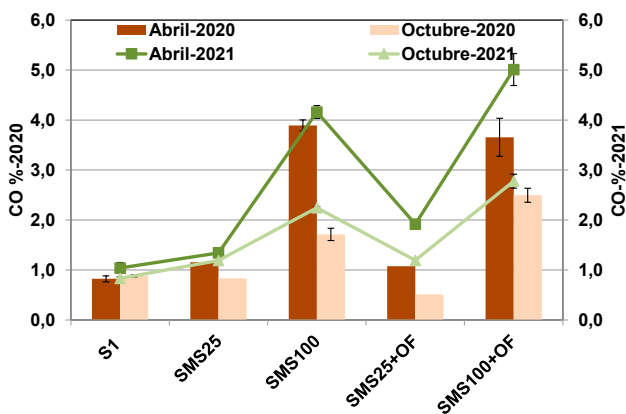


FIGURA 2A
Evolución del %CO en el suelo S1 (testigo) y del mismo suelo con los distintos tratamientos orgánicos y minerales

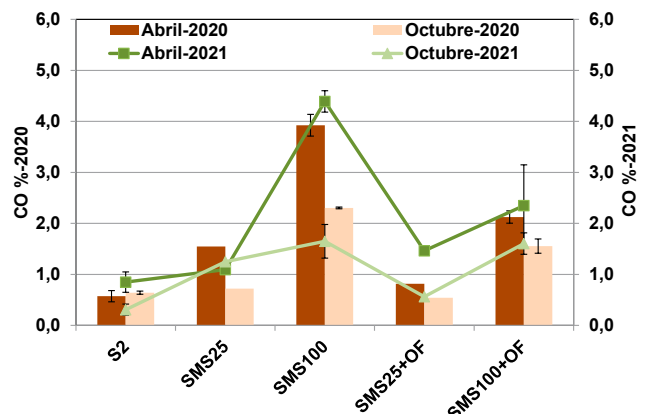


FIGURA 2B
Evolución del %CO en el suelo S2 (testigo) y del mismo suelo con los distintos tratamientos orgánicos y minerales

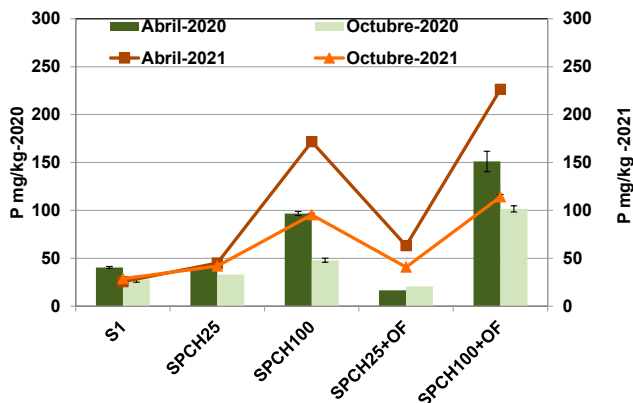


FIGURA 3A
Evolución del contenido en P en el suelo S1 (testigo) y del mismo suelo con los distintos tratamientos orgánicos y minerales.

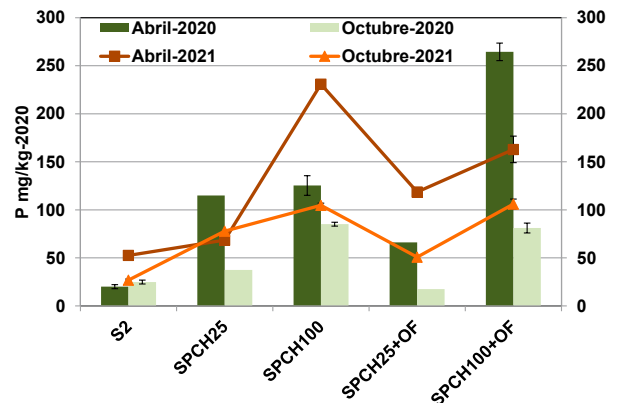


FIGURA 3B
Evolución del contenido en P en el suelo S2 (testigo) y del mismo suelo con los distintos tratamientos orgánicos y minerales.

los niveles de CO en suelos de viñedo arenoso después de la aplicación anual de estiércol de ganado compostado y SPCH durante 28 años consecutivos. Además, la madurez de la MO presente en las enmiendas puede influir en la capacidad de secuestro de carbono en el suelo. Kubat y Lipavsky (2006) destacan que las moléculas orgánicas más complejas y estables tienen un mayor potencial para el secuestro de carbono en comparación con las moléculas menos maduras y más fácilmente degradables.

- Cambios en macronutrientes, micronutrientes y capacidad de intercambio catiónico

Como era de esperar, el fósforo, el potasio, el calcio y el magnesio disponibles aumentaron en los suelos enmendados debido a los nutrientes proporcionados por las enmiendas orgánicas (Paula *et al.*, 2017). El contenido de fósforo y potasio (Figura 3 y 4) aumentaron inicialmente con la dosis alta de SPCH (S1) o con ambas dosis de SPCH (S2), pero luego disminuyeron con el tiempo ($p \leq 0,05$). Los cambios en el contenido de calcio y magnesio no fueron significativos después de la aplicación de la enmienda. El contenido de fósforo era de 40,4 mg kg⁻¹ y 20,1 mg kg⁻¹ en suelos no enmendados de S1 y S2, respectivamente (Tabla 1) y aumentaron de 3,7

a 8,8 veces (S1) y de 13.2 a 4.4 veces (S2) después de la primera y segunda aplicación de las enmiendas respectivamente (Figuras 3A y 3B). El contenido de fósforo disminuyó siete meses después de la aplicación para ambos años experimentales, pero se registró un aumento real en el contenido de fósforo de ambos suelos enmendados con un efecto acumulativo entre el 12% y el 98% en S1 y del 23% al 190% en S2.

El contenido de potasio fue de 629 mg kg⁻¹ y 322 mg kg⁻¹ en suelos no enmendados de S1 y S2, respectivamente (Tabla 1) y aumentó de 2,7 a 5,9 veces (S1) y de 3,8 a 5,8 veces (S2) en los suelos con SPCH después de la primera y segunda aplicación de SPCH, respectivamente (Figuras 5A y 5B). El contenido de potasio disminuyó después de la vendimia en un 58% y 37% (S1) y en un 58% y 51% (S2) para ambos años. De manera similar al contenido de fósforo, hubo un aumento en el contenido de potasio entre el 24% y el 260% en S1 y del 90% -217% en S2 después de la segunda aplicación (octubre 2021) (Figuras 4A y 4B).

Se encontraron correlaciones significativas entre el contenido de CO del suelo y el contenido de P, K, Ca o Mg ($r = 0,89-0,99$, rango de $p = 0,050-0,000$) en S1, y $r = 0,84-0,99$, rango de $p = 0,050-0,000$ en S2) después de

ambos años de aplicación de enmiendas, lo que indica que SPCH y SPCH + OF podrían ser fuentes potenciales de P y K en los suelos.

El potencial de las enmiendas orgánicas y minerales para mejorar el contenido de nutrientes disponibles en un suelo degradado tras la aplicación de estos residuos ha sido indicado en la bibliografía (Amoah-Antwi *et al.*, 2020; Bonanomi *et al.*, 2020) y (Basak *et al.*, 2021; Cunha *et al.*, 2022; Swoboda *et al.*, 2022). Esto confirma el suministro de estos nutrientes a los suelos a través del SPCH y SPCH + OF, aunque el mantenimiento de un nivel adecuado depende de la naturaleza de los residuos, de la dosis aplicada o de las aplicaciones sucesivas de residuos (Calleja-Cervantes *et al.*, 2015a, 2015b).

La capacidad de intercambio de carbono (CIC) fue de 6.56 (S1) y 5.01 (S2) cmol+ kg⁻¹ (Tabla 1), y se podrían esperar cambios en este parámetro en suelos enmendados porque la CIC es proporcionada por los componentes orgánicos o minerales del suelo (Arthur *et al.*, 2011). Sin embargo, solo se observaron aumentos significativos en la CIC después de la segunda aplicación de SPCH100 o SPCH100 + OF en S1 (hasta cuatro veces) y en S2 (hasta 2,7 veces). Otros autores como Morlat y Chaussod (2008) también publicaron aumentos en la CIC a tra-