

# INNOVACIÓN EN BIOFUMIGACIÓN: *Avances en la selección y monitoreo de cultivos biofumigantes*

Durante años, el manejo de las enfermedades transmitidas por el suelo ha dependido en gran medida de fumigantes químicos, pero su uso está siendo cada vez más restringido debido a los impactos negativos sobre el medio ambiente, los riesgos para la salud humana y las regulaciones más estrictas que promueven prácticas agrícolas más sostenibles. Esta situación ha llevado a investigadores y productores a buscar alternativas que permitan manejar los problemas fitosanitarios sin comprometer la salud del suelo ni la biodiversidad. En este contexto, la biofumigación ha surgido como una herramienta prometedora para reemplazar o complementar los métodos tradicionales.

ARROYO, J.M. Y PALMERO, D.

Departamento de Producción Agraria, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB), Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, España

## ¿SABÍAS QUE?

Las enfermedades transmitidas por el suelo son, sin duda, uno de los mayores desafíos para la agricultura actual. Estas enfermedades, causadas por organismos tan diversos como hongos (*Verticillium*, *Sclerotinia*, *Rhizoctonia*, *Fusarium*), Oomicetos (*Phytophthora*), bacterias (*Ralstonia*, *Clavibacter*, *Pseudomonas*, *Pectobacterium*, *Streptomyces*), nematodos (*Meloidogyne*, *Heterodera*, *Globodera*) e, incluso virus, como el TBSV (*Tomato bushy stunt virus*) o el MNSV (*Melon necrotic spot virus*), afectan la calidad y el rendimiento de los cultivos y son muy complicados de controlar.

La biofumigación utiliza plantas que, al ser incorporadas al suelo tras su trituración, liberan compuestos naturales con propiedades biocidas. Estos compuestos, como los isotiocianatos generados a partir de glucosinolatos (GSL), son particularmente eficaces en la supresión de microorganismos patógenos en el suelo. Este mecanismo no solo permite reducir la incidencia de enfermedades transmitidas por el suelo, sino que también tiene efectos positivos en la estructura y la salud del suelo, la mejora de su fertilidad, la prevención de la erosión y la reducción de la pérdida de nutrientes esenciales como el nitrógeno.

## ¿Qué plantas se usan como biofumigantes?

Entre las plantas más destacadas para su empleo como biofumigantes

se encuentran las de la familia de las Brassicáceas, como *Brassica juncea*, *B. carinata*, *Raphanus sativus* y *Sinapis alba*. Estas especies han demostrado un gran potencial gracias a su rápido crecimiento, su alta capacidad de acumulación de biomasa y su elevada concentración de glucosinolatos, compuestos secundarios que, al descomponerse en el suelo mediante la acción de la enzima mirosinasa, generan isotiocianatos. Estas sustancias poseen un amplio espectro antimicrobiano, lo que las convierte en una herramienta eficaz para controlar enfermedades transmitidas por el suelo.

Estudios recientes realizados en los campos experimentales de la Universidad Politécnica de Madrid (Arroyo *et al.* 2025 a y b) (Figura 1), han evaluado el potencial de estas especies bajo condiciones climáticas específicas, destacando la importancia de seleccionar las especies más adecuadas según las



**FIGURA 1**  
Vista general de las parcelas experimentales de especies biofumigantes en los campos de ensayo de la Universidad Politécnica de Madrid.

**FIGURA 2**  
Calibración del dron equipado con cámara multiespectral antes del vuelo mediante paneles de referencia, utilizada para estimar índices vegetativos en cultivos biofumigantes.



condiciones locales y los ciclos de cultivo. La selección de especies biofumigantes efectivas se basó en tres factores clave: la capacidad de producción de biomasa, la concentración y el perfil de glucosinolatos (GSL), y la adaptación a condiciones climáticas locales.

Los resultados mostraron diferencias significativas en la acumulación de biomasa entre las especies estudiadas (**Figura 3**). En ciclos cortos de cultivo (aproximadamente 75 días), *R. sativus* y *S. alba* sobresalieron por su rápida acumulación de biomasa, alcanzando valores de hasta 650 g/m<sup>2</sup> en términos de biomasa seca total, lo que las hace ideales para estrategias de biofumigación en períodos limitados de crecimiento. Por otro lado, *B. juncea* y *B. carinata* lograron una acumulación de biomasa más lenta pero consistente, lo que, junto con su capacidad de adaptación a períodos más largos de cultivo, las posiciona como opciones robustas en ciclos de mayor duración. Entre las especies analizadas en campo, se han identificado *Brassica juncea* y

*B. carinata* como especies con altos niveles de glucosinolatos alifáticos, especialmente efectivos en la supresión de patógenos, tales como la sinigrina, que es conocida por su alta actividad biocida. *S. alba* y *R. sativus*, aunque presentaron una menor concentración de GSL alifáticos, compensaron con una mayor producción de biomasa. La combinación de estas características subraya la importancia de considerar tanto la calidad (perfiles de glucosinolatos) como la cantidad de los mismos incorporada al suelo (concentración de GSL en la biomasa y producción

de biomasa) para optimizar los efectos biofumigantes.

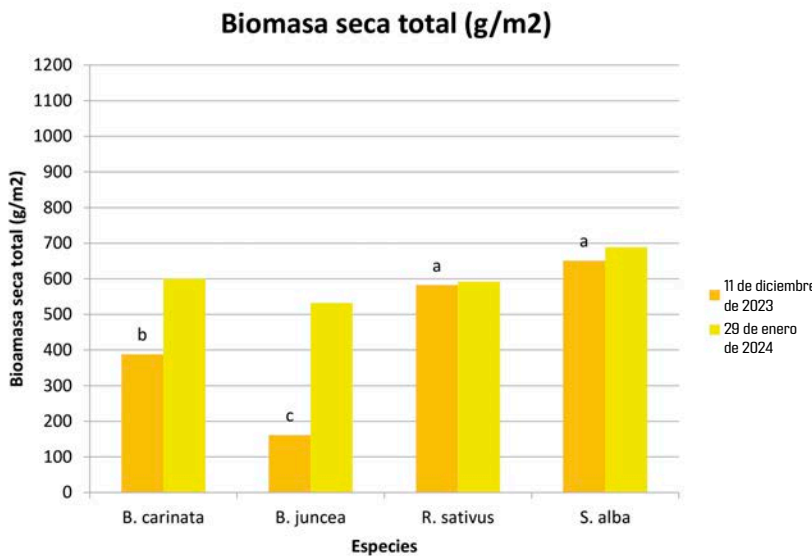
Este análisis permitió no solo caracterizar las propiedades biofumigantes de estas especies, sino también evaluar su adaptabilidad a las condiciones climáticas de la zona centro.

Los ensayos realizados bajo las condiciones climáticas de España central revelaron una sensibilidad diferenciada de las especies frente a heladas. Durante períodos de bajas temperaturas, *B. carinata* y *S. alba* mostraron mayor sensibilidad, con reducciones significativas en sus tasas de crecimiento.

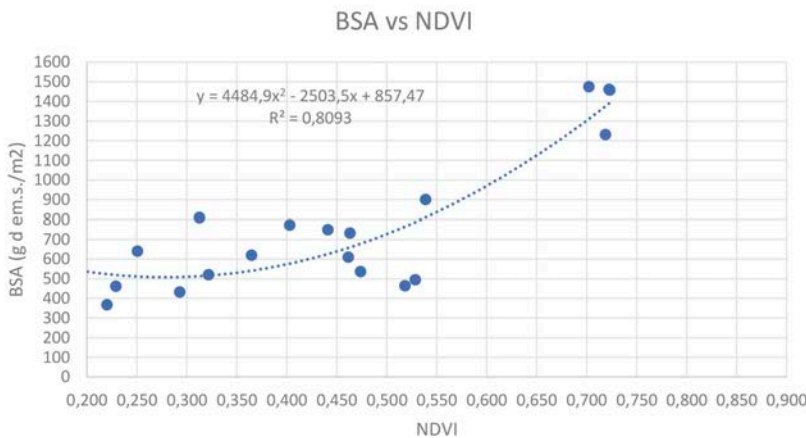
En contraste, *B. juncea* y *R. sativus* demostraron una mayor tolerancia a las bajas temperaturas, lo que sugiere que estas especies podrían ser más idóneas para regiones con inviernos fríos. El empleo de tecnologías como índices fitespectrales tales como NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDRE (*Normalized Difference Red-Edge Index*), GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*), TCARI/OSAVI (*Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index*)/“*Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index*”

obtenidos mediante sensores remotos (cámaras multispectrales acopladas a drones) (Figura 2) y otros determinados mediante sensores próximos (reflectómetros portátiles para medida de índice de contenido de clorofila foliar SPAD) permitieron estimar con suficiente precisión la biomasa acumulada y/o la concentración de GSL en las especies estudiadas. Mientras que el NDVI se mostró adecuado para estimar la biomasa acumulada (Figura 4), fue el índice NDRE el que ofreció la mejor capacidad predictiva de la

concentración y del contenido total de glucosinolatos en la biomasa aérea. Estos hallazgos validan el uso de herramientas no destructivas para el manejo y monitoreo de cultivos biofumigantes. Consecuentemente, la integración de índices fitespectrales y drones proporciona información valiosa para poder optimizar en tiempo real las decisiones técnicas, asegurando que las especies biofumigantes sean incorporadas en el momento ideal para maximizar la liberación de isotiocianatos y minimizar el impacto de factores ambientales adversos. El uso de modelos de aprendizaje automático (*Machine Learning*) mejoró significativamente la capacidad predictiva respecto a los modelos tradicionales, lo que valida su integración en el manejo de cultivos biofumigantes. Estas tecnologías permiten a los investigadores y técnicos monitorizar el crecimiento de los cultivos biofumigantes y optimizar el momento idóneo para su incorporación al suelo para maximizar su efecto biofumigante. Más allá de su efecto fitosanitario, estos cultivos biofumigantes tienen un potencial adicional tanto como sumideros de carbono y nitrógeno como en la mejora de la calidad del suelo.



**FIGURA 3**  
Producción de biomasa seca en especies biofumigantes evaluadas en los ensayos de la UPM. *S. alba* fue la especie más productiva en ambos ciclos.



**FIGURA 4**  
El índice NDVI, obtenido mediante sensores remotos, mostró una relación positiva con la biomasa seca aérea de los cultivos biofumigantes, lo que permite estimar su crecimiento sin necesidad de muestreos destructivos.

### Agradecimientos y financiación

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto PID2021-125545OR-C22 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.

### Bibliografía

Arroyo, J. M., Soler, J., Linares, R., & Palmero, D. (2025). Strategies for selecting potentially effective biofumigant species for optimal biofumigation outcomes. *Agriculture*, 15(2), 147. <https://doi.org/10.3390/agriculture15020147>

Arroyo, J. M., Soler, J., Linares, R., Parra, L., & Palmero, D. (2025). Integrating biofumigation and phyto-spectral monitoring: Advancing sustainable agricultural practices. *Industrial Crops & Products*, 235, 121814. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121814>