

UNIVERSIDAD DE GRANADA

**FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FISIOLÓGÍA VEGETAL**

**Programa de Doctorado en Biología
Fundamental y de Sistemas**



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

**Factores implicados en el
decaimiento del espárrago en
España. Estrategias de control.
FIDEC.**

**Francisco Javier López Moreno
Tesis Doctoral
Granada 2023**

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Francisco Javier López Moreno
ISBN: 978-84-1195-489-1
URI: <https://hdl.handle.net/10481/96709>

Financiación, estancias y publicaciones

El trabajo que se presenta en esta memoria de Tesis Doctoral ha sido realizado en el IFAPA Centro Camino de Purchil, perteneciente al Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica, en virtud de un contrato predoctoral para la formación de doctores contemplado en el Subprograma Estatal de Formación del Programa Estatal de Promoción del Talento y su Empleabilidad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016: Resolución de la Presidencia de la Agencia Estatal de Investigación por la que se aprueba la convocatoria, correspondiente al año 2017, cofinanciada por el FSE.

Participación en el Grupo de Investigación “Fisiología y fitotecnia de cultivos para el desarrollo de una agricultura sostenible” (AGR-282, Plan Andaluz de Investigación, Junta de Andalucía), conformado por el Departamento de Fisiología Vegetal de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada (España) y el centro IFAPA Camino de Purchil (Granada), desde Julio de 2018 hasta enero de 2023.

Estancias realizadas:

- Estancia de movilidad internacional en la Wageningen University Research - Business Unit Glastuinbouw, Bleiswijk (Países Bajos). Bajo la supervisión de los Investigadores Frank Kempkes y Jan Jansen, durante el periodo comprendido entre 01 de enero de 2019 y el 01 de Julio del 2019.

- Publicaciones en revistas internacionales, derivadas del presente trabajo de Tesis Doctoral:

- López-Moreno, F. J., Atero-Calvo, S., Navarro-León, E., Blasco, B., Soriano, T., & Ruiz, J. M. (2021). Evaluation of Physiological and Quality Parameters of Green Asparagus Spears Subjected to Three Treatments against the Decline Syndrome. *Agronomy*, 11(5), 937.
- López-Moreno, F.J., Ruiz, J.M., Blasco, B., de Cara, M., Navarro León, E. and Soriano, T. (2021). Factors involved in asparagus decline and effects of control techniques on survival, growth and production. *Acta Hortic.* 1327, 221-228 DOI:10.17660/ActaHortic.2021.1327.29
- Noperi-Mosqueda, L. C.¹, López-Moreno, F. J.¹, Navarro-León, E., Sánchez, E., Blasco, B., Moreno, D. A., Soriano, T., & Ruiz, J. M. (2020). Effects of asparagus decline on nutrients and phenolic compounds, spear quality, and allelopathy. *Scientia Horticulturae*, 261, 109029.

* 1 These authors have contributed equally, so they should be considered as joint first authors.

- Parte de los resultados obtenidos han sido presentados en los siguientes congresos y reuniones científicas:

- López- Moreno, FJ., Ruiz, J.M., Blasco, B., De Cara, M., Navarro-León, E., Soriano, T., (2021). Factors involved in asparagus decline and effects of control techniques on survival, growth and production. Oral Communication. IV International Symposium on Horticulture in Europe, Stuttgart (Germany). 9-11 march, 2021.
- López- Moreno, FJ., Soriano, T., Palmero, D., Navarro- León, E., Lastra, E., Sayadi S., (2021) Caracterización productiva y técnica de las explotaciones de espárragos (*Asparagus officinalis* L.) en España, formato oral. XVI Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas, Córdoba (España). 17-22 de octubre de 2021.

ÍNDICE

RESUMEN/ ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	22
1. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA Y TAXONOMÍA DEL ESPÁRRAGO (<i>ASPARAGUS OFFICINALIS</i> L.)	23
2. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA Y SITUACIÓN ECONÓMICA DEL CULTIVO DE ESPÁRRAGO	30
3. ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA	33
4. ETIOLOGÍA DEL SÍNDROME DEL DECAIMIENTO DEL ESPÁRRAGO.....	36
5. <i>FUSARIUM</i>	39
6. SUSTANCIAS ALELOPÁTICAS.....	41
7. ESTRATEGIAS DE CONTROL	44
OBJETIVOS.....	48
MATERIAL Y MÉTODOS	50
1. CARACTERIZACIÓN DE LAS EXPLOTACIONES DE ESPÁRRAGOS EN ESPAÑA.	51
2. IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES ABIÓTICOS IMPLICADOS EN EL SDE.....	54
2.1. <i>Diseño experimental</i>	54
2.2. <i>Análisis del material vegetal</i>	59
2.2.1. <i>Parámetros de crecimiento</i>	59
2.2.2. <i>Caracterización fisiológica del cultivo</i>	60
2.2.3. <i>Cosecha y calidad</i>	66
3. DETERMINACIÓN DE LA EFICACIA DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE CONTROL	70
3.1. <i>Diseño experimental</i>	70
3.2. <i>Análisis del material vegetal</i>	75
3.2.1. <i>Parámetros de crecimiento</i>	75
3.2.2. <i>Caracterización fisiológica del cultivo</i>	75
3.2.3. <i>Cosecha y calidad</i>	75
4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	76
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
1. CARACTERIZACIÓN DE LAS EXPLOTACIONES DE ESPÁRRAGOS EN ESPAÑA.	78
2. IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES ABIÓTICOS IMPLICADOS EN EL SDE.....	86
2.1 PARÁMETROS DE CRECIMIENTO	86
2.1.1. <i>Análisis no destructivos</i>	86
2.1.2. <i>Análisis Destructivos</i>	90
2.2. CARACTERIZACIÓN FISIOLÓGICA	96
2.2.1. <i>Pigmentos</i>	96
2.2.2. <i>Hormonas</i>	98
2.2.3. <i>Metabolismo oxidativo</i>	103
2.2.4. <i>Metabolismo de fenoles</i>	117
2.2.5. <i>Nutrientes</i>	129
2.3. COSECHA Y CALIDAD	133
2.3.1. <i>Cosecha</i>	133
2.3.2. <i>Calidad</i>	139
3. DETERMINACIÓN DE LA EFICACIA DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE CONTROL	142
3.1. PARÁMETROS DE CRECIMIENTO	142
3.1.1. <i>Análisis no destructivos</i>	142
3.1.2. <i>Análisis destructivos</i>	148
3.2. CARACTERIZACIÓN FISIOLÓGICA	151
3.2.1 <i>Pigmentos</i>	151
3.2.2. <i>Hormonas</i>	154
3.2.3. <i>Metabolismo oxidativo</i>	158
3.2.4. <i>Metabolismo de fenoles</i>	174
3.2.5. <i>Nutrientes</i>	184
3.3. COSECHA Y CALIDAD	188
3.3.1. <i>Cosecha</i>	188
3.3.2. <i>Calidad</i>	192

DISCUSIÓN GENERAL.....	196
1. CARACTERIZACIÓN DE LAS EXPLOTACIONES DE ESPÁRRAGOS EN ESPAÑA	197
2. IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES ABIÓTICOS IMPLICADOS EN EL SDE.....	198
3. DETERMINACIÓN DE LA EFICACIA DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE CONTROL	202
CONCLUSIONES / CONCLUSIONS	205
BIBLIOGRAFÍA.....	210

RESUMEN/ ABSTRACT

El cultivo de espárragos es de gran relevancia comercial en la agricultura mundial, y España destaca como el quinto productor a nivel global y el segundo en Europa, concentrando la mayor superficie cultivada en Andalucía. Este cultivo ha experimentado un significativo crecimiento en la región debido a su potencial exportador y rentabilidad económica, además de ser una fuente importante de empleo temporal, especialmente durante su temporada de exportación. No obstante, el síndrome de decaimiento del espárrago (SDE) ha tenido un impacto negativo, ocasionando pérdidas económicas y reducciones en la productividad.

El SDE es un problema complejo con múltiples factores involucrados, incluyendo la calidad del suelo, el manejo agronómico, el clima y la presencia de patógenos. Se ha asociado con la podredumbre de raíces y coronas causada por *Fusarium* spp., aunque otros factores abióticos y la acumulación de compuestos alelopáticos también pueden estar involucrados. Este síndrome ha llevado a reducciones drásticas en el periodo productivo, forzando a los productores a abandonar fincas afectadas en busca de nuevas áreas de cultivo.

Las sustancias alelopáticas, compuestos químicos liberados por las plantas, pueden ser otra razón del síndrome de decaimiento y problemas de replantación. Se cree que los compuestos fenólicos, como los ácidos cumárico, cafeico y ferúlico, podrían estar involucrados en la autotoxicidad del espárrago. Sin embargo, su efecto específico aún no se comprende completamente.

Para controlar el SDE, se han identificado diversas estrategias. Los cultivares resistentes a *Fusarium* podrían ser útiles para su control. En cuanto al control químico, no se puede erradicar *Fusarium* del interior de las semillas o garras mediante métodos químicos, pero se puede eliminar de la superficie del

material de plantación con soluciones de lejía. Las enmiendas orgánicas, especialmente las de la familia Brassicaceae para la biofumigación, pueden mejorar las condiciones del suelo y suprimir patógenos. Además, el control biológico con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal también puede ser una opción.

Asimismo, se recomienda evitar especies sensibles a *Fusarium* en la rotación de cultivos y mantener un adecuado manejo agrícola, incluyendo el uso de fertilizantes orgánicos y análisis regulares del suelo. En resumen, el control del síndrome del decaimiento del espárrago requiere un enfoque integral que involucre estrategias agronómicas, biológicas y químicas para mitigar el impacto de *Fusarium* y otras sustancias alelopáticas en el cultivo.

El objetivo general de la tesis doctoral consiste en la identificación de los factores abióticos implicados en el decaimiento prematuro de las plantaciones de espárrago en las regiones productoras españolas, así como ensayar estrategias de control que permitan continuar con el cultivo de espárrago en parcelas que hayan mostrado síntomas de decaimiento.

Primeramente, se pretendió caracterizar factores culturales asociados al síndrome de decaimiento del espárrago (condiciones edafoclimáticas y técnicas culturales aplicadas). Para ello se realizaron encuestas a agricultores asociados de cooperativas de comercialización en las principales zonas productoras de España, obteniendo información sobre las características de las parcelas, el riego, el cultivo, las técnicas agrícolas, las plagas y enfermedades, y la sintomatología del decaimiento. Los resultados de las encuestas realizadas mostraron que El cultivo de espárrago en la zona estudiada, está ampliamente

distribuido especialmente en La Vega de Granada-Loja, pero se observa un manejo inadecuado en las explotaciones, con deficiente riego y falta de desinfección del suelo y agua. Estas prácticas pueden favorecer enfermedades fúngicas y acumulación de sustancias alelopáticas en el suelo, contribuyendo al síndrome del decaimiento.

Los siguientes objetivos evaluaron el efecto del SDE en la fisiología y metabolismo de la planta, además de la Identificación de los agentes abióticos causantes del decaimiento del espárrago mediante el análisis del complejo de compuestos alelopáticos implicados en suelo y su efecto en la fisiología del cultivo, indicadores de estrés y efectos en producción final. Para ello se realizó ensayo se realizó en una finca experimental en Granada para ratificar factores abióticos relacionados con el síndrome de decaimiento del espárrago (SDE). Se utilizaron tres tipos de suelos, uno sin cultivo previo de espárragos (T1), otro suelo procedente de una parcela con fuertes síntomas de SDE desinfectado para eliminar patógenos (T2) y otro con el mismo suelo que T2, pero sin desinfectar (T3). Se plantaron garras de espárrago en contenedores excavados en el suelo con los tratamientos anteriormente mencionados y se analizó el desarrollo de las plantas. El SDE afectó a la fisiología y metabolismo de la planta, con posible relación con compuestos alelopáticos como el ácido ferúlico. Se encontró que la desinfección del suelo (T2) no tuvo efectos beneficiosos inmediatos en el control del SDE y podría estar relacionada con una pérdida de desarrollo y rendimiento del cultivo a largo plazo. Además, se evidenció que el SDE puede estar asociado con una mayor formación de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que podría tener efectos tóxicos en las plantas. Se sugiere que la comunidad microbiana

desequilibrada debido a la desinfección del suelo podría haber contribuido al SDE y afectado negativamente el rendimiento del cultivo.

Por último, se pretendió determinar la eficacia de diferentes estrategias de control y su efecto en el crecimiento de plantas, en la producción obtenida y la fisiología del cultivo. Para ello se seleccionó una parcela de cultivo de espárrago en El Jau, Granada, para el ensayo de estrategias de control. Se aplicaron 4 tratamientos en 16 parcelas aisladas y separadas por un dique de riego. Los tratamientos incluyeron biofumigación con pellets de *Brassica carinata* y de estiércol de gallinaza, desinfección química con Dazomet y un control sin tratar. La parcela mostraba síntomas severos del síndrome de decaimiento en el cultivo anterior. Los resultados mostraron que la desinfección química con Dazomet y la biosolarización con pellets de *B. carinata* mostraron efectos positivos en el crecimiento y rendimiento del espárrago. Sin embargo, el tratamiento con pellets de gallinaza mostró limitaciones en su eficacia. En conclusión, la desinfección química y la biosolarización con *B. carinata* son opciones prometedoras para controlar el SDE, mientras que el tratamiento con pellets de gallinaza podría descartarse como estrategia.

En conclusión, la tesis ha identificado factores abióticos implicados en el síndrome de decaimiento del espárrago y ha probado estrategias de control efectivas como la desinfección química con Dazomet y la biosolarización con *B. carinata*. Estos hallazgos resaltan la importancia de adoptar prácticas agrícolas más sostenibles y adecuadas para mejorar el rendimiento y la calidad del cultivo de espárrago y mitigar los efectos del SDE.

The cultivation of asparagus is of great commercial relevance in global agriculture, with Spain standing out as the fifth-largest producer worldwide and the second in Europe, with the largest cultivated area in Andalusia. This crop has experienced significant growth in the region due to its export potential and economic profitability, serving as a vital source of temporary employment, particularly during the export season. However, the asparagus decline syndrome (SDE) has had a negative impact, causing economic losses and reduced productivity.

The SDE is a complex problem involving multiple factors, including soil quality, agronomic practices, climate, and the presence of pathogens. It has been associated with root and crown rot caused by *Fusarium spp.*, though other abiotic factors and the accumulation of allelopathic compounds may also play a role. This syndrome has led to drastic reductions in the productive period, compelling producers to abandon affected farms in search of new cultivation areas.

Allelopathic substances, chemical compounds released by plants, may also contribute to the asparagus decline syndrome and replanting issues. Phenolic compounds, such as ferulic, caffeic, and cumaric acids, are believed to be involved in asparagus autotoxicity, though their specific effects are not yet fully understood.

Various strategies have been identified to control the SDE, such as using *Fusarium*-resistant cultivars. In terms of chemical control, *Fusarium* cannot be eradicated from inside seeds or crowns using chemical methods, but it can be eliminated from the surface of planting material with bleach solutions. Organic amendments, particularly from the Brassicaceae family for biofumigation, can

improve soil conditions and suppress pathogens. Additionally, biological control with plant growth-promoting rhizobacteria can be considered.

Furthermore, it is recommended to avoid *Fusarium*-sensitive species in crop rotation and maintain appropriate agricultural management, including the use of organic fertilizers and regular soil analysis. In conclusion, controlling the asparagus decline syndrome requires a comprehensive approach involving agronomic, biological, and chemical strategies to mitigate the impact of *Fusarium* and other allelopathic substances on the crop.

The overall objective of this doctoral thesis is to identify abiotic factors involved in the premature decline of asparagus plantations in Spanish production regions and test control strategies to continue asparagus cultivation in plots showing symptoms of decline.

Firstly, the goal was to characterize cultural factors associated with the asparagus decline syndrome, such as edaphoclimatic conditions and applied cultural techniques. For this purpose, surveys were conducted among associated farmers of marketing cooperatives in Spain's main production zones, gathering information on plot characteristics, irrigation, cultivation, agricultural techniques, pests and diseases, and decline symptoms. The survey results showed that asparagus cultivation in the studied zone is widely distributed, especially in La Vega de Granada-Loja. However, inadequate management practices, including poor irrigation and lack of soil and water disinfection, were observed in the farms. These practices could favor fungal diseases and the accumulation of allelopathic substances in the soil, contributing to the asparagus decline syndrome.

The following objectives evaluated the effect of the SDE on plant physiology and metabolism, as well as the identification of abiotic agents causing asparagus decline through the analysis of the complex of allelopathic compounds involved in the soil and their effects on crop physiology, stress indicators, and final production. For this purpose, a trial was conducted in an experimental farm in Granada to confirm abiotic factors related to the asparagus decline syndrome (SDE). Three types of soils were used: one without previous asparagus cultivation (T1), another from a plot with strong SDE symptoms, disinfected to eliminate pathogens (T2), and another with the same soil as T2 but not disinfected (T3). Asparagus crowns were planted in containers dug into the soil with the mentioned treatments, and the plant's development was analyzed. The SDE affected plant physiology and metabolism, with a potential relationship with allelopathic compounds like ferulic acid. It was found that soil disinfection (T2) did not have immediate beneficial effects on SDE control and could be related to long-term reductions in crop development and yield. Additionally, it was evident that the SDE could be associated with increased formation of reactive oxygen species (ROS), which might have toxic effects on plants. It is suggested that the unbalanced microbial community due to soil disinfection could have contributed to the SDE and negatively impacted crop yield.

Lastly, the objective was to determine the effectiveness of different control strategies and their effects on plant growth, yield, and crop physiology. For this purpose, an asparagus cultivation plot in El Jau, Granada, was selected for the trial of control strategies. Four treatments were applied in 16 isolated plots separated by an irrigation dike. The treatments included biofumigation with pellets of *B. carinata* and chicken manure, chemical disinfection with Dazomet,

and an untreated control. The plot showed severe symptoms of the asparagus decline syndrome in the previous crop. The results showed that chemical disinfection with Dazomet and biosolarization with *B. carinata* pellets had positive effects on asparagus growth and yield. However, the treatment with chicken manure pellets showed limitations in its effectiveness. In conclusion, chemical disinfection and biosolarization with *B. carinata* are promising options to control the SDE, while the treatment with chicken manure pellets may be discarded as a strategy.

In conclusion, this thesis has identified abiotic factors involved in the asparagus decline syndrome and tested effective control strategies such as chemical disinfection with Dazomet and biosolarization with *B. carinata*. These findings highlight the importance of adopting more sustainable and appropriate agricultural practices to improve asparagus crop yield and quality and mitigate the effects of the SDE.

INTRODUCCIÓN

1. Descripción botánica y taxonomía del espárrago (*Asparagus officinalis* L.)

El espárrago (*Asparagus officinalis* L.) es una planta herbácea que crece hasta los 2 m de altura, monocotiledónea, perenne y dioica (Moreno-Pinel et al., 2021) y pertenece al Reino Plantae; división Magnoliophita; familia Liliáceae; género *Asparagus* y especie *officinalis* (Mortarini, 2021). La palabra espárrago procede del griego Asparagos, que significa brote o retoño, y se publicó por primera vez en inglés hacia el año 1000 d.C. Esta planta es originaria de la región oriental del Mediterráneo y es cultivada para la producción de turiones o tallos tiernos. Ya se utilizaba como alimento vegetal y fuente medicinal cerca de Asuán, en Egipto, hace unos 20.000 años, por su sabor y sus propiedades diuréticas. Apareció como regalo en un friso egipcio hacia el año 3000 a.C. y también se reconoció anteriormente en Siria y España (M. Iqbal et al., 2017). Cuenta con 150 especies ampliamente dispersas en regiones tropicales y subtropicales de hasta 1500 m de altitud y predomina en regiones del sur de África, Europa, Australia y Asia (Negi et al., 2010).

Algunas especies de *Asparagus officinalis* se diferencian en su nivel de ploidía (Ozaki et al., 2004). Estas diferencias en la ploidía pueden influir en las características morfológicas y agronómicas de cada especie, así como en su capacidad de hibridación y mejora genética, por lo que son importantes para la investigación y el cultivo de estas plantas (Mousavizadeh et al., 2022). Los espárragos cultivados actualmente son diploides ($2n=2x=20$), aunque existen algunas variedades locales tetraploides ($2n=40$), como "Morado de Huetor" en España (Moreno et al., 2006), "HT156" en España (Moreno et al., 2008), "Violetto d'Albenga" en Italia (Falavigna & Fantino, 1985) y "Cereseto" y "Poire" en

Argentina (López Anido et al., 2000). Además, se han desarrollado cultivares tetraploides como 'Purple Passion' (Benson et al., 1996) y 'Purple Pacific' (Fallon & Andersen, 1999), que derivan de la variedad local 'Violetto d'Alvenga'. La poliploidía en el género *Asparagus* también parece estar relacionada con la adaptación a nuevos entornos, según Castro et al. (2013). Por ejemplo, la variedad de espárrago "Morado de Huétor" parece ser un híbrido resultante de un cruce natural de *A. officinalis* y *A. maritimus* (Moreno et al., 2008). Esta variedad local híbrida presenta diferentes niveles de ploidía ($2n=2x, 3x, 4x, 5x, 6x, 8x$) y alta variabilidad genética (Carmona-Martín et al., 2014). De esta manera se hace factible generar híbridos triploides cruzando "Morado de Huétor" con cultivares comerciales, movilizand o nuevas fuentes genéticas (Moreno et al., 2008). Carmona-Martin et al. (2014) han mencionado que se está buscando genotipos octoploides de espárrago en la naturaleza debido a que se cree que estas plantas presentan características agronómicas deseables, aunque hasta el momento, se han identificado pocos de estos genotipos.

El espárrago se describió botánicamente en 1799. Los taxónomos modernos incluyeron el espárrago en la familia *Asparagaceae* en lugar de *Liliaceae* (Chase et al., 2009). Anteriormente, los espárragos se clasificaban en el género *Allium*, junto a cebollas y ajos (familia *Liliaceae*), pero más tarde las cebollas se clasificaron en la familia *Amaryllidaceae* y los espárragos en la familia *Asparagaceae* (Goyal et al., 2003).

El espárrago es la única especie de su género que es cultivada como hortaliza (Ornstrup, 1997). La planta de espárrago está formada por tallos aéreos ramificados y una parte subterránea conocida comúnmente como garra, corona o araña (Figura 1) que consiste en un rizoma expandido lateralmente que

presenta yemas en su extremo apical, raíces carnosas de almacenamiento de reservas y raíces laterales de absorción (Castagnino et al., 2006). El crecimiento de la garra ocurre cuando las yemas periféricas originan nuevos grupos de gemación para la próxima generación de la planta (Asprelli et al., 2005). La tasa de inducción y crecimiento de las yemas responden directamente al aumento de temperatura (Dean, 1999); con el aumento de ésta a finales del invierno comienzan a emerger del rizoma los brotes jóvenes llamados turiones, que son la parte comestible de la planta (Ornstrup, 1997). Éstos no emergerán con temperaturas de suelo por debajo de 12°C tratando de evitar así los posibles daños producidos por heladas, si bien al principio de la temporada de cosecha es frecuente que los turiones se vean dañados por las bajas temperaturas del aire y deban desecharse.

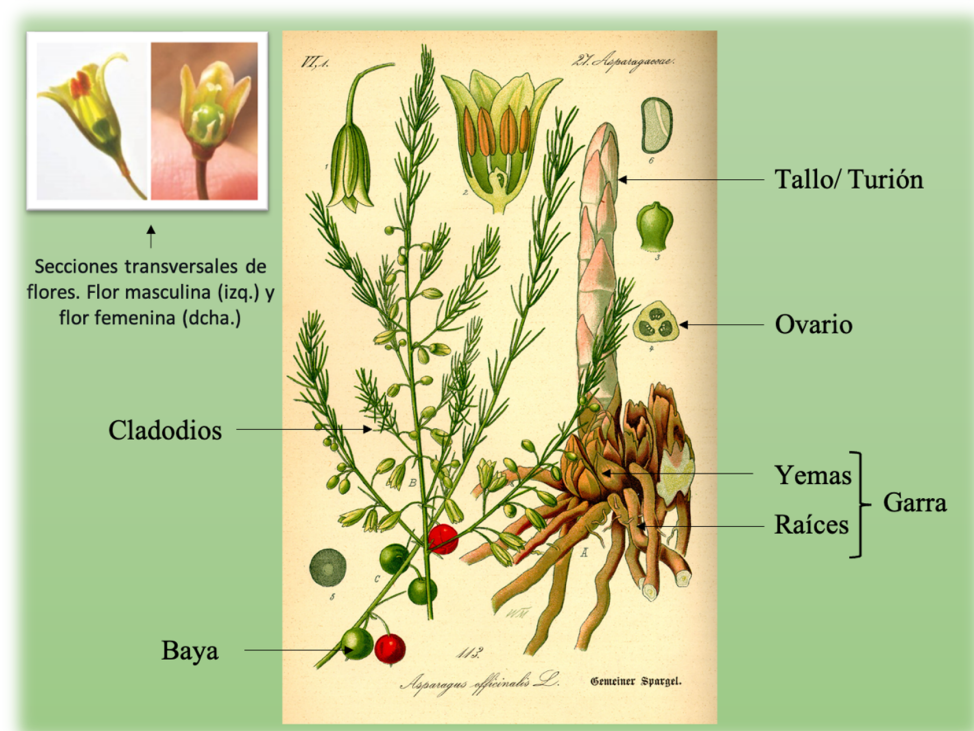


Figura 1. Representación ilustrativa de las partes vegetativas y reproductivas de una planta de espárrago. Adaptado de Thomé et al. (1886) y Cermeño Sacristán (2018).

Los turiones que se desarrollan con posterioridad a la etapa de cosecha (finales de mayo) forman el follaje que dará lugar a la parte aérea de la planta, también conocido como “helecho”, el cual comienza a senescer en el otoño (Kirschenbilder, 2014). En el período de desarrollo vegetativo es esencial cubrir las demandas de agua y nutrientes para el correcto crecimiento de la garra que acumulará reservas para la brotación en la primavera siguiente. Durante el periodo de dormancia invernal el nivel de sacarosa de la raíz aumenta y puede servir como señal de inducción de las yemas cuando la temperatura aumenta (D. T. Drost, 2020).

La multiplicación de este cultivo puede llevarse a cabo mediante trasplante de garras o bien mediante siembra de semillas. La temperatura óptima en el suelo para su germinación es de 24 a 30°C; a esta temperatura la emergencia de las plántulas se produce en 10 días tras la siembra, mientras que con temperaturas de 15°C tarda 24 días en emerger y 53 días con 10°C de temperatura (Castagnino et al., 2006).

Como se ha citado anteriormente, *Asparagus officinalis*, la especie más ampliamente cultivada de espárragos, es una planta dioica, existiendo plantas que solo tienen flores femeninas y otras que sólo poseen flores masculinas. . Su polinización es cruzada con un elevado porcentaje de alogamia (Mortarini, 2021). Las flores masculinas son generalmente solitarias, campanuladas y pequeñas, miden 5-6 mm de largo y las femeninas unos 4 mm, siendo el color de las masculinas amarillo y el de las femeninas amarillo verdoso. El pedúnculo floral mide unos 25 mm de largo. Tiene frutos de color rojo conocidos como bayas (7-9 mm de diámetro). Los frutos suelen contener 6 semillas negras con una

cubierta arrugada y quebradiza (M. Iqbal et al., 2017). Tiene cladodios finos y aplanados de color verde, presentes en racimos y de 1 a 10 cladodios por racimo.

El ciclo completo de desarrollo de *A. officinalis*, como en todas las descripciones BBCH [Biologische Bundesanstalt (Julius Kühn-Institut), Bundessortenamt, Chemische Industrie] de plantas, se subdivide en fases de desarrollo claramente reconocibles y distinguibles. Estas fases principales de crecimiento se describen utilizando números del 0 al 9 en orden ascendente (Tabla 1). Sin embargo, el estado principal de desarrollo 4 (desarrollo de las partes vegetativas cosechables de la planta) no es aplicable en el caso del espárrago, ya que la cosecha tiene lugar en el estado principal de desarrollo 3. Los estados 1 y 2 tampoco se producen; el estado 1 únicamente se desarrolla el primer año cuando las plantas proceden de semilla. El estado 2 (Formación de brotes laterales) no procede puesto que la planta carece de brotes laterales emergiendo del tallo principal las parte aéreas compuestas.

Tabla 1 Fases de desarrollo de la planta de *Asparagus officinalis* (Feller et al., 2012) de acuerdo con los principios del sistema BBCH.

Estado principal de desarrollo	
0	Germinación/brotación
1	Desarrollo de la plántula
3	Alargamiento del tallo
5	Aparición de la inflorescencia
6	Floración
7	Desarrollo del fruto
8	Maduración del fruto
9	Senescencia, comienzo del letargo

El resto de estados principales de desarrollo del 3 al 8 corresponden a la fase de desarrollo vegetativo de la planta durante la cual absorbe agua y nutrientes que acumula en las raíces.

El espárrago tiene un periodo productivo de 10-12 años y llega al máximo de producción a los cuatro o cinco años, siendo más productivas las plantas masculinas que las femeninas (Castagnino, 2009). Las plantas masculinas presentan mayor número de turiones mientras que las femeninas tienen mayores diámetros (Risso et al., 2012). Una elevada productividad, buen diámetro de turiones y precocidad son esenciales para obtener un apropiado retorno de la inversión, ya que el precio de turiones grandes es mayor que el de los pequeños, percibiéndose precios más elevados a finales de invierno e inicio de la primavera, cuando comienzan a comercializarse los primeros espárragos (Ellison & Kinelski, 1986).

La mejora genética del cultivo da lugar a mayores producciones, mejor calidad y adaptabilidad climática (Reuther, 1996). De esta forma, se pueden mejorar aspectos como la brotación, la maduración, el peso y el número de turiones. Por ejemplo, en condiciones de temperaturas excesivamente altas se produce la apertura prematura de los extremos de los turiones, haciendo que se ramifiquen a baja altura, siendo estos no comerciables (Ellison & Kinelski, 1986), de ahí que la precocidad se vuelva un factor muy importante para escapar de las altas temperaturas que comienzan a registrarse al final de la primavera. Otro aspecto relevante a tener en cuenta sería disponer variedades de espárrago de brotación uniforme, ya que esto permitiría lograr una producción concentrada, optimizando y reduciendo el periodo de cosecha, disminuyendo por tanto los costos de la misma. Gatti et al. (2000), redundan en estos aspectos, afirmando

que, desde el punto de vista productivo, las características más relevantes en la mejora del espárrago son el número y el peso promedio de los turiones ya que son las variables que determinan rendimiento.

Para su comercialización los espárragos se clasifican en distintos subgrupos dependiendo de su color, de la variedad y del sistema de manejo (Baron & Vallejo, 1990). Se diferencian en dos tipos principales en cuanto al color se refiere, los espárragos verdes y los blancos (Figura 2). La principal diferencia que existe entre ellos es que, en el caso de los espárragos verdes, los turiones emergen por encima del suelo de cultivo recibiendo la luz solar (Figura 2A) y son cosechados cuando adquieren la longitud óptima para su venta en el mercado, que oscila entre 20- 24 cm, dependiendo de la demanda. En el caso de los espárragos blancos, estos permanecen bajo el suelo en caballones de unos 30 cm de altura y son cosechados antes de que emerjan a la superficie y, por lo tanto, no reciben luz solar (Figura 2B). Este efecto también se puede conseguir mediante sistemas distintos a los caballones, como pueden ser túneles o acolchados plásticos que no permiten el paso de la luz solar (Figura 2).



Figura 2. Detalle de cultivo y cosecha de espárrago verde (A) y blanco (B).

2. Distribución geográfica y situación económica del cultivo de espárrago

El cultivo del espárrago tiene un papel comercial muy importante en la agricultura mundial. Actualmente, cuenta con un área cosechada superior a los 1,5 millones de ha, y una producción por encima de los 8 millones de toneladas. España, con más de 14.200 hectáreas dedicadas al cultivo del espárrago y producciones de 65.000 t, es el quinto productor mundial y el segundo europeo tras Alemania (Faostat, 2022). Andalucía aglutina el 69% de la superficie nacional (9.382 ha), seguida de Navarra (1.933 ha), Castilla la Mancha + Madrid (964 ha + 75 ha) y Extremadura (781 ha) (ESYRCE 2022) (Figura 3).

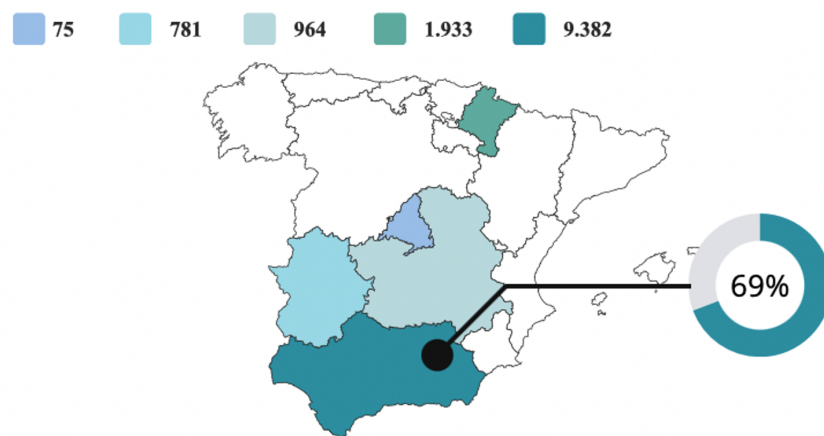


Figura 3. Superficie cultivada de espárrago en España (ha).

La superficie dedicada al espárrago en Andalucía ha pasado de 5.946 ha en 2012 a 9.382 ha en la actualidad, lo que ha supuesto un nicho de mercado y

empleo muy relevante en la región. Durante el periodo de crisis económica se observó un incremento sustancial de la superficie de cultivo que absorbió mano de obra desempleada. Actualmente, es un cultivo emergente, con posibilidades de ampliar producción al haberse abierto importantes vías de exportación a Europa a través de las cooperativas comercializadoras de las producciones costeras de hortalizas de invernadero. Granada es el principal exportador de espárrago en Andalucía. En el año 2022 se exportaron más de 14.000 t, seguida de Málaga con más de 1.000 t y Almería alrededor de las 600 t, generando unos ingresos por encima de los 59 M€, 3 M€ y más de 2,5 M€ respectivamente. El espárrago es un cultivo rentable con un valor de exportación promedio de 4€ por kg (Tabla 2), por lo que los agricultores pueden obtener un beneficio económico significativo al cultivarlo, siendo 2,43€/kg el precio medio obtenido en la campaña 2022 (Observatorio de Precios y Mercados. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía, 2023). Si tenemos en cuenta los 10 últimos años y según la misma fuente, el precio medio ha estado en 1,80 €/Kg, con picos superiores a los 3,5 €/kg al principio de temporada.

Además, supone una fuente importante de empleo temporal debido al alto volumen de exportaciones durante varios meses al año que precisan trabajadores para la cosecha diaria y el procesado posterior en las industrias exportadoras. Así mismo, permite completar el calendario laboral anual a los trabajadores agrícolas con otros cultivos como el olivo, almendro, hortalizas y cereales de verano, cultivos habituales en las mismas zonas productoras.

Tabla 2. Total, de las exportaciones de espárrago andaluzas por provincia y año.

Exportaciones de espárrago									
	2020			2021			2022		
	Volumen (T)	Valor total (Millones de €)	Valor (€ kg ⁻¹)	Volumen (T)	Valor total (Millones de €)	Valor (€ kg ⁻¹)	Volumen (T)	Valor total (Millones de €)	Valor (€ kg ⁻¹)
Almería	621,11	2,05	3,30	512,64	1,97	3,84	603,35	2,81	4,65
Cádiz	5,35	0,02	3,19	1,31	0,00	3,35	6,79	0,06	8,29
Córdoba	395,25	1,48	3,73	522,22	2,36	4,52	412,00	2,06	5,00
Granada	15.001,06	47,05	3,14	15.302,03	59,71	3,90	14.134,38	59,23	4,19
Huelva	5,23	0,01	2,18	104,24	0,47	4,48	101,34	0,48	4,71
Jaén	61,59	0,22	3,51	82,27	0,38	4,58	39,44	0,10	2,46
Málaga	1.094,80	3,60	3,29	1.291,87	5,31	4,11	929,31	3,70	3,98
Sevilla	251,27	0,92	3,65	446,17	1,90	4,25	489,60	2,27	4,64

Fuente: DataComex, 2023. El valor (€ kg⁻¹) de las exportaciones ha sido calculado como el cociente entre el valor total (Millones de €) y el volumen exportado (t).

La época en la que se centra el grueso de los trabajos de cosecha y exportación corresponde con las fechas que van desde marzo hasta finales de mayo o junio según se adelanten o no las altas temperaturas, las cuales producen la apertura de las brácteas de la cabeza del turión que deja de ser comercial (Figura 4). Hay algunos agricultores que cortan la parte vegetativa en el verano, para cosechar los nuevos turiones que brotan antes de la bajada de la temperatura al final del otoño. Este tipo de cosecha es conocida comúnmente como verdeo y normalmente se realiza cuando el cultivo se encuentra en su fase final (12-15 años), ya que limita la asimilación de nutrientes y fotoasimilados al ser interrumpida su fase vegetativa. Como resultado de esta práctica se produce un agotamiento significativo de reservas, lo que conlleva consecuentemente a un agotamiento prematuro del cultivo (Serrano Cermeño, 2003).

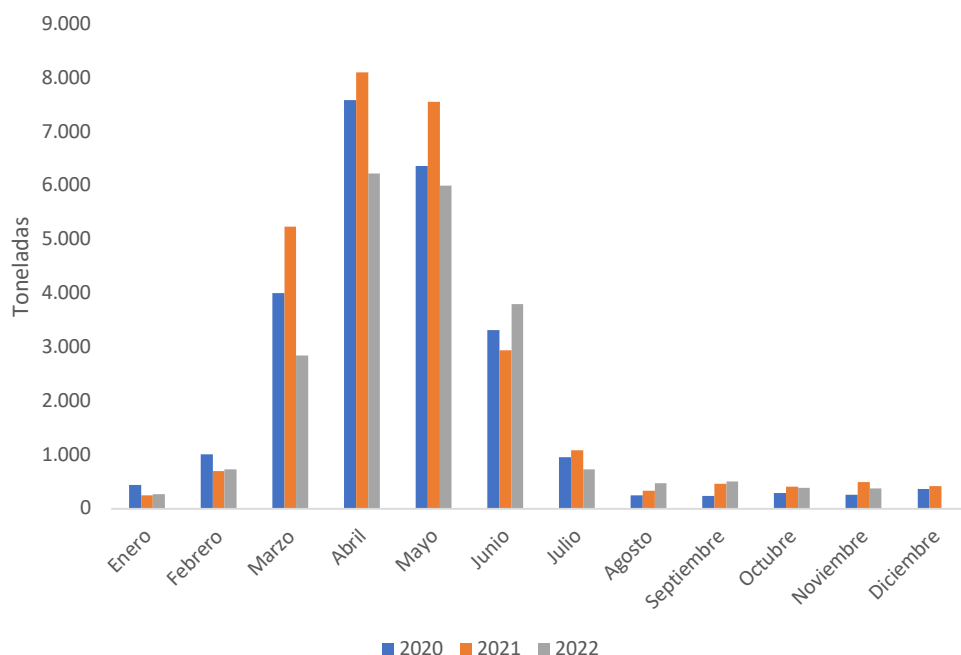


Figura 4. Evolución mensual de las exportaciones de espárrago en Andalucía durante las campañas comprendidas entre 2020 y 2022. Fuente: Datacomex, 2023.

3. Estado actual del problema

El espárrago es un cultivo muy extendido en España, estando el 69% de su superficie concentrada en Andalucía (ESYRCE 2022). Es un alimento de alta calidad por su contenido en antioxidantes, con efecto preventivo de la hipertensión e incluso antitumoral (Wang et al., 2013). También se debe destacar su importante papel en la economía de las zonas productoras.

Sin embargo, en los últimos años, el síndrome de decaimiento de las plantaciones de espárragos (SDE) que provoca la muerte prematura de las plantas (Figura 5), se ha extendido cada vez más en todas las zonas de producción del mundo (Elmer, 2001), afectando también negativamente a las posibles replantaciones (Motoki et al., 2002).



Figura 5. Cultivo de espárrago con alta mortalidad de plantas debido al síndrome del decaimiento.

El SDE es el principal problema de tipo sanitario del cultivo en la mayoría de las zonas productoras del mundo (García et al., 2022). Además, cuando las plantaciones gravemente afectadas por el decaimiento se replantan con nuevas plantas de espárrago trasplantadas en el mismo suelo, éstas también se ven afectadas negativamente (Elmer, 2015; Motoki et al., 2002; Kato-Noguchi et al., 2018a). Este problema provoca importantes pérdidas económicas en el sector. Concretamente, la región de Andalucía está fuertemente afectada por este síndrome. La superficie cultivada sufrió un fuerte descenso (21,5%) desde 2018 hasta febrero de 2021, concretamente, de 10.071 ha en 2018 a 7.555 ha en 2021. En la actualidad se ha recuperado superficie cultivada llegando hasta las

9.382 ha (Faostat 2022), con el riesgo que supone el SDE para las nuevas plantaciones y la consecuente pérdida de suelo disponible para cultivo.

Este síndrome está dando lugar a drásticas reducciones del periodo productivo, que obligan a los productores a abandonar las fincas afectadas y buscar otras nuevas donde seguir desarrollando el cultivo. En la provincia de Granada, en las Vegas del Genil y Comarca del Poniente Granadino, se estima que en las próximas campañas un 15% de las actuales plantaciones (en torno a 900 ha), superarán los 10 años de plantación, y tendrán que ser levantadas. Además, debido a la gran expansión que ha experimentado este cultivo durante el periodo de crisis económica, los productores no disponen de tierras nuevas sin precedente de cultivo de espárrago y se arriesgan a plantar en parcelas con historial de espárrago, probando soluciones con productos de supuesto efecto mitigante, no testados en experimentación científica, al no disponer de una solución avalada por trabajos de investigación. Como consecuencia, los síntomas de decaimiento prematuro aparecen en el segundo y tercer año después de la replantación, sin depender del periodo de descanso entre plantaciones (Brizuela et al., 2020).

4. Etiología del Síndrome del decaimiento del espárrago

El SDE afecta a las plantaciones de espárrago en todo el mundo. Como se ha indicado, se caracteriza por la muerte prematura de las plantas, la disminución en el rendimiento y la pérdida de calidad de los turiones (Figura 6).



Figura 6. Amplia zona de cultivo de espárrago verde afectada por el síndrome del decaimiento.

El SDE se citó por primera vez en España en los años ochenta (Tello J.C. et al., 1991) y constituye un problema complejo cuyas causas pueden ser múltiples y cuyos síntomas pueden agravarse por la interacción de los distintos factores implicados incluyendo la calidad del suelo, el manejo agronómico, el clima y la presencia de patógenos. En concreto su causalidad parece estar relacionada con una combinación de factores bióticos y abióticos, aunque la causa exacta del SDE aún no se conoce por completo (Linda Citlalli Noperi-Mosqueda et al., 2020).

En cuanto a los factores bióticos, la podredumbre de raíces y coronas (PRC) causada por *Fusarium* spp. se ha asociado frecuentemente con el síndrome (Blok & Bollen, 1996a; Elmer, 2018; Schereuder et al., 1995) y ha sido objeto de proyectos de investigación en Andalucía, cuyos resultados han indicado una clara relación entre la PRC y diversas especies de *Fusarium* cuya preponderancia varía con el área geográfica del cultivo (Corpas-Hervias et al., 2007),.

Sin embargo, en ocasiones los síntomas de decaimiento no se han podido asociar a la presencia patogénica. Entre los factores abióticos que se han relacionado con el síndrome de decaimiento del espárrago, se ha citado la acumulación en el suelo de compuestos alelopáticos producidos por las propias plantas de espárrago, las cuales afectan y en ocasiones impiden el desarrollo de posteriores cultivos de espárrago (Blok & Bollen, 1993; Lake et al., 1993; Schofield, 1991). Además, parece existir una interacción entre algunos compuestos alelopáticos y la PRC, ya que la presencia de tales compuestos predispone al desarrollo de la PRC (Hartung & Stephens, 1983). No obstante, aunque se han sugerido compuestos fenólicos, saponinas, triptófano y ácido cafeico como compuestos alelopáticos causantes del SDE (Lake et al., 1993), el efecto concreto de estas sustancias sobre el cultivo del espárrago no está suficientemente estudiado y sus posibles interacciones con la microbiota y microfauna del suelo (Lake et al., 1993), o con los mecanismos de defensa de la planta son aún desconocidas.

Otras posibles causas del decaimiento del espárrago citadas son los problemas derivados de la acumulación de residuos de herbicidas, el

agotamiento de nutrientes y las alteraciones en la estructura del suelo (Schofield, 1991).

Finalmente, también se han sugerido como posibles causas: la expansión del cultivo del espárrago a zonas marginales por su climatología o condiciones edáficas; el cambio de variedades tradicionales más tolerantes a la fusariosis por otras más productivas, pero también más sensibles; el manejo del riego y el cansancio del suelo por agotamiento de nutrientes (Schofield, 1991). Elmer (2018) también sugiere que las lesiones invernales de la corona y la excesiva presión de la cosecha, junto con agentes bióticos como insectos, malas hierbas y enfermedades contribuyen al declive y al problema de la replantación.

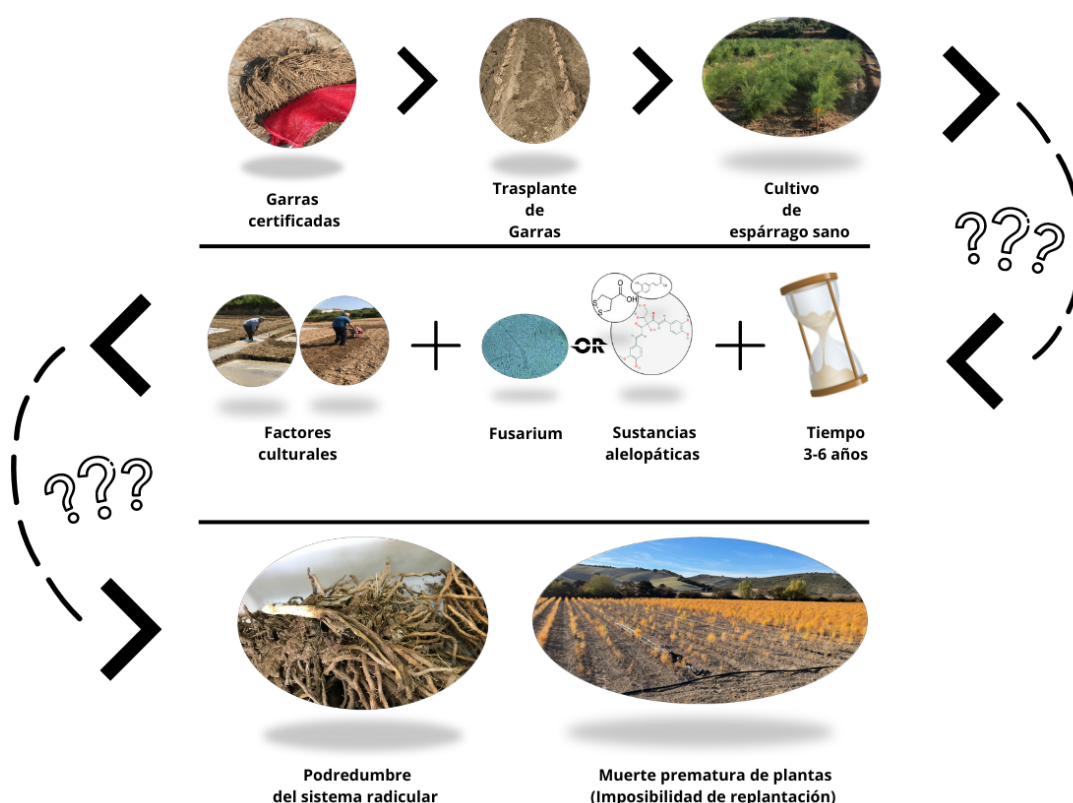


Figura 7. Mapa conceptual de las fases- causas del síndrome del decaimiento del espárrago.

5. *Fusarium*

Como se ha indicado el decaimiento del espárrago se asocia en la bibliografía a varias especies de *Fusarium* (Wong & Jeffries, 2006). El hongo produce la podredumbre de la corona y de la raíz del espárrago que causa el declive de la planta. Las especies causantes son principalmente *Fusarium oxysporum* f. sp. *asparagi*, *F. proliferatum* (Elmer, 2001) y *F. redolens* (Baayen et al., 2007a). La identificación de las poblaciones de *Fusarium* se ha basado tradicionalmente en características culturales y micromorfológicas, pero este enfoque puede ser insuficiente debido a la limitación de caracteres taxonómicos y la gran variabilidad entre diferentes especies de *Fusarium* (Leslie et al., 2001) (Figura 8). Además, los caracteres microscópicos son sensibles a las condiciones ambientales, lo que aumenta el riesgo de interpretaciones erróneas (Leslie et al., 2001; O'Donnell & Gray, 1995). Estas dificultades para delimitar las especies han dado lugar a diversos esquemas taxonómicos, que reconocen entre 30 y 101 especies de *Fusarium* (Booth, 1971; Gerlach & Nirenbergh, 1982; Nelson et al., 1983). En particular, es complicado distinguir entre *F. oxysporum* y otras especies pertenecientes a las secciones *Elegans* y *Liseola* (Fravel et al., 2003), así como entre especies morfológicamente similares como *F. oxysporum* y *F. redolens*, que precisamente, son dos de los *Fusarium* asociados al declive de los espárragos (Baayen & Gams, 1988; Baayen et al., 2007).

Los estudios de investigación llevados a cabo en Andalucía han demostrado una relación evidente entre la PRC y tres tipos de hongos, *F. oxysporum* f. sp. *asparagi*, *F. proliferatum* y *F. solani* (Corpas-Hervias et al., 2007), cuya prevalencia cambia según la zona geográfica en la que se cultiven. El análisis de garras de espárrago procedentes de viveros y de plantas afectadas

en campos comerciales mostró que *F. oxysporum* fue la especie dominante en las garras de vivero, mientras que *F. proliferatum* lo fue en el sistema radical de las plantas afectadas en campo. *F. solani* sólo se aisló de plantas afectadas en campo, siendo sus aislados muy virulentos (Corpas-Hervias et al., 2007). Además, se observaron diferencias significativas entre la distribución de propágulos de *F. oxysporum* en campos de espárragos blancos y verdes (Brizuela, de la Lastra, et al., 2020).

Para investigar las posibles fuentes de inóculo de estos patógenos y la efectividad de las prácticas de desinfección del suelo para controlar el SDE, se han creado recientemente técnicas moleculares utilizando la técnica de reacción en cadena de la polimerasa cuantitativa en tiempo real (qPCR). Estas herramientas moleculares basadas en qPCR demostraron ser más precisas y rápidas en la detección y cuantificación específica y sensible de los patógenos fúngicos en comparación con los métodos de cultivo tradicionales (de la Lastra, Camacho, et al., 2021).

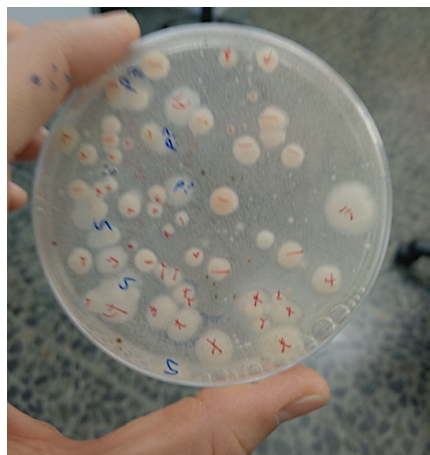


Figura 8. Unidades formadoras de colonias de *Fusarium*

La PRC es una enfermedad difícil de controlar debido a la prolongada supervivencia del patógeno en el suelo y su fácil diseminación con el material de propagación (Elmer, 2001; Corpas-Hervias et al., 2006). Además, la condición semi-perenne del cultivo del espárrago restringe las posibilidades de control a actuaciones pre-plantación y resulta clave la prevención de la enfermedad mediante el uso de garras certificadas libres de estos patógenos y el establecimiento de las plantaciones en campos exentos de los mismos (Blok & Bollen, 1996b; Corpas-Hervias et al., 2007).

No obstante, en ocasiones los síntomas de decaimiento no se han podido asociar con la presencia de hongos patógenos del género *Fusarium* (Castro et al., 2023). Por ello, diversos estudios han explorado otras posibles causas del SDE, entre ellas, la producción por parte de la misma planta de sustancias alelopáticas autotóxicas (Yeasmin et al., 2014).

6. Sustancias Alelopáticas

La alelopatía se define como el impacto que ejerce directamente un compuesto químico liberado por una planta sobre el crecimiento y desarrollo de otra planta (FAO, 2001). Se sabe que las sustancias alelopáticas son producidas por la planta en respuesta a situaciones de estrés ambiental. Estos compuestos pueden ser beneficiosos o perjudiciales para la planta que los produce, y pueden actuar a través de diferentes mecanismos (Fei et al., 2000).

Se cree que una de las posibles razones del decaimiento y del problema de replantación del espárrago es la autotoxicidad del espárrago. Sin embargo, los compuestos implicados en la autotoxicidad no están claros (Kato-Noguchi et al., 2018). Los compuestos fenólicos (Figura 9) pueden estar implicados en fenómenos de fitotoxicidad o autotoxicidad en los cultivos (Kato-Noguchi et al.,

2017, 2018). Así, estos compuestos podrían ser responsables de la autotoxicidad que se produce cuando se reitera la plantación de una misma especie en una parcela, tanto si su ciclo es anual como si es plurianual. Ejemplos de estos cultivos plurianuales son la alfalfa (*Medicago sativa* L.), el espárrago (*Asparagus officinalis* L.) y la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) (Webber lii et al., 2018). En cuanto al espárrago, la autotoxicidad es atribuida por diversos autores a la liberación de compuestos aleloquímicos, principalmente los ácidos cumárico, cafeico y ferúlico (Elmer & Pignatello, 2011; Kato-Noguchi et al., 2018b).

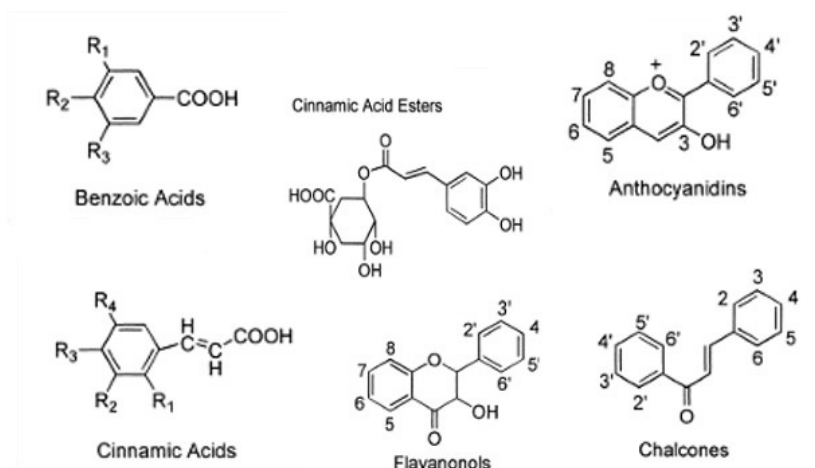


Figura 9. Estructura química de fenoles típicos (Robards, 2003)

Sin embargo, aunque los compuestos alelopáticos podrían ser los causantes del síndrome de decaimiento del espárrago (Kato-Noguchi et al., 2018; Lake et al., 1993; Sunada et al., 2008), el efecto específico de estas sustancias en el cultivo del espárrago no ha sido suficientemente estudiado y aún se desconocen sus posibles interacciones con los microorganismos del suelo o con los mecanismos de defensa de la planta. Además, el efecto de la

variedad también podría ser importante ya que estudios como el de Yeasmin et al. (2014) encontraron diferencias en la producción de sustancias alelopáticas entre variedades.

Según un estudio de Kato-Noguchi et al. (2017), después de 10 años de cultivo de espárragos, se registró una acumulación de 174 μM de ácido trans-cinámico en los suelos, lo que podría ser suficiente para inhibir el crecimiento de los espárragos debido a su valor IC_{50} . Por lo tanto, se sugiere que el ácido trans-cinámico podría ser uno de los factores responsables de los problemas de decaimiento y de replantación del espárrago, y podría contribuir al efecto autotóxico de los suelos en los que se han cultivado espárragos.

Por otro lado, Miller et al. (1991) investigaron qué compuestos de las raíces de espárrago podían inhibir la germinación de las semillas de espárrago e identificaron el ácido cafeico como inhibidor de la germinación. También descubrieron que el ácido cafeico actuaba sinérgicamente con *Fusarium oxysporum* f. sp. Asparagi. En otro experimento, Hartung & Stephens (1983) sometieron los extractos crudos de las raíces y los residuos de la corona a bioensayos en placas de Petri con diferentes especies de hongos aislados y se observó que inhibían el crecimiento de los hongos oomicetos. Los extractos de las raíces resultaron ser más activos que los extractos de otras partes de las plantas de espárrago. Esto puede indicar que la planta emite estas sustancias alelopáticas como respuesta y defensa a los ataques producidos por los patógenos.

7. Estrategias de control

Se han identificado diversas técnicas para el control del síndrome del decaimiento del espárrago que se describen a continuación.

Cultivares resistentes. Los cultivares de espárrago tienen escasa resistencia a *Fusarium* y es difícil la obtención de cultivares resistentes debido a la alta diversidad genética y patogénica del hongo (Ochiai et al., 2002; Corpas-Hervias et al., 2006). No obstante, en pruebas de patogenicidad, se confirmó la menor susceptibilidad de los cvs. Dariana, Plasenesp y Morado de Huétor a todos los aislados del patógeno *F. solani* evaluados, en contraste con la gran susceptibilidad del cv. Grande, uno de los más utilizados. Estos resultados, junto al buen comportamiento agronómico de Dariana y Plasenesp, y a la calidad organoléptica de Morado de Huétor, aconsejan su utilización en áreas previamente afectadas por la enfermedad (Corpas et al., 2006). La obtención de cultivares resistentes a *F. oxysporum* sería la estrategia más eficaz para el control del patógeno (Kathe et al., 2019).

Control químico. La erradicación de *Fusarium* del interior de las semillas o de las garras no es posible mediante métodos químicos, aunque estos tratamientos aplicados al material de propagación proporcionan protección a corto plazo (Elmer, 2001). No obstante, sí puede eliminarse de la superficie del material de plantación mediante su inmersión en una solución acuosa de lejía comercial al 20% (v) durante 2-5 minutos.

En la actualidad tampoco existen medidas satisfactorias para evitar el problema de la replantación en campos que hayan mostrado síntomas de

decaimiento, estando muy limitada la disponibilidad de agroquímicos autorizados por la Unión Europea. Por ello, se requiere una evaluación científica y comparativa de la efectividad de diversos métodos de desinfección del suelo en la reducción del inóculo de *Fusarium* patógenos en él, en la disminución de la enfermedad y en el incremento de la productividad del espárrago.

Enmiendas orgánicas. La adición de enmiendas orgánicas a suelos o sustratos se ha utilizado comúnmente para mejorar las condiciones del suelo (Hader et al., 1992) y para proteger los cultivos al suprimir una amplia variedad de patógenos de suelo (Lazarovits, 2001; Noble y Coventry, 2005; Bonanomi et al., 2007; Avilés et al., 2011). Para el control de la PRC en espárrago, se ha evaluado la efectividad de la aplicación de enmiendas orgánicas como la gallinaza y su pellet y el compost de alperujo, combinados con la solarización del suelo durante periodos de 30-45 días en condiciones controladas. Los resultados obtenidos en laboratorio, indicaron que el pellet de gallinaza fue la enmienda más eficaz para reducir las poblaciones de *F. oxysporum* y *F. solani* (Borrego-Benjumea et al., 2010), pero estos resultados no se han confirmado en condiciones de campo.

Por otro lado, Las especies de la familia Brassicaceae son las plantas más utilizadas para la biofumigación. Estas plantas contienen glucosinolatos, que producen compuestos, como los isotiocianatos, tras una hidrólisis enzimática, con efectos fungicidas científicamente probados. Las especies más utilizadas pertenecen a los géneros *Brassica*, *Raphanus*, *Sinapis* y *Eruca*. Además de la liberación de compuestos en el suelo, en la biofumigación también intervienen mecanismos complementarios, como el aporte de materia orgánica y nutrientes, y la mejora de la estructura del suelo (dos Santos, 2021).

Control biológico. Para evitar el uso de agroquímicos en la agricultura, están surgiendo métodos alternativos para controlar los patógenos de las plantas. Algunas rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) pueden utilizarse como agentes de biocontrol ya que pueden inducir protección frente a patógenos (de la Lastra, Camacho, et al., 2021).

En ensayos realizados en cámara e invernadero se redujo la severidad de los síntomas causados por *F. oxysporum* f. sp. asparagi y se incrementó el vigor y el peso seco de las plantas en tratamientos con *Trichoderma* spp. y con cepas no patogénicas de *F. oxysporum* (Rubio-Pérez et al., 2008). Sin embargo, su efectividad depende de las densidades del patógeno en el suelo y de su virulencia (Reid et al., 2002).

Rotación de cultivos. En un suelo donde previamente se ha cultivado espárrago es muy importante no usar especies sensibles a *Fusarium* para llevar a cabo la rotación. La gama de huéspedes sintomáticos de *F. oxysporum* f.sp. asparagi está restringida al espárrago y al ajo, aunque puede colonizar las raíces de otros cultivos, como varias leguminosas y cereales, cebolla, girasol, patata, remolacha y zanahoria (Blok y Bollen, 1997; Molinero-Ruíz et al., 2010). Molinero-Ruiz et al. (2010) también identificaron aislados de *F. proliferatum* y *F. solani*, patógenos del espárrago como patógenos del ajo y en ocasiones, de la cebolla por lo que se refuerza la necesidad de evitar las rotaciones con ajo o cebolla en zonas afectadas por la PRC

Manejo de cultivo. El manejo adecuado del suelo y la fertilización son fundamentales para prevenir y controlar el SDE. Se recomienda el uso de fertilizantes orgánicos y la aplicación de fertilizantes inorgánicos en cantidades

adecuadas y en momentos oportunos. También se deben realizar análisis de suelo regulares para identificar las deficiencias de nutrientes y ajustar la fertilización en consecuencia.

Otro aspecto esencial para prevenir el SDE es el manejo adecuado de la humedad y el riego por su efecto favorecedor del desarrollo de enfermedades fúngicas cuando se mantienen niveles elevados.

Maskova et al. (2023) ensayaron diversos manejos y técnicas de cultivo, concluyendo que laboreos poco profundos y el intercropping con centeno tienen un impacto mejorador significativo en la cosecha; sin embargo, los laboreos profundos, aporcados e intercropping con mostaza tuvieron un resultado negativo.

Finalmente, indicar que los dos métodos más ensayados entre los descritos son:

a) la fumigación química del suelo, que es eficaz en el control de patógenos (Fravel et al., 2003) pero que debe verificarse en condiciones agroambientales locales

b) el aporte de enmiendas orgánicas combinado con la solarización del suelo (biosolarización), cuya eficacia sólo ha sido probada en condiciones controladas (Borrego et al., 2014).

OBJETIVOS

El objetivo general de la tesis doctoral consiste en la identificación de los factores abióticos implicados en el decaimiento prematuro de las plantaciones de espárrago en las regiones productoras españolas, así como ensayar estrategias de control que permitan continuar con el cultivo de espárrago en parcelas que hayan mostrado síntomas de decaimiento.

Este objetivo general se concreta en los siguientes objetivos específicos:

1. Caracterizar factores culturales asociados al síndrome de decaimiento del espárrago (condiciones edafoclimáticas y técnicas culturales aplicadas).
2. Efecto del SDE en la fisiología y metabolismo de la planta.
3. Identificación de los agentes abióticos causantes del decaimiento del espárrago mediante el análisis del complejo de compuestos alelopáticos implicados en suelo y su efecto en la fisiología del cultivo, indicadores de estrés y efectos en producción final.
4. Determinar la eficacia de diferentes estrategias de control y su efecto en el crecimiento de plantas, en la producción obtenida y la fisiología del cultivo

MATERIAL Y MÉTODOS

1. Caracterización de las explotaciones de espárragos en España.

Se contactó con las principales cooperativas de comercialización de espárrago de la zona sur: Espárrago de Granada, Los Gallombares, San Isidro y Centro-Sur. En cada una de ellas se distribuyó cartelería de difusión del proyecto (Figura 12A) para, con la colaboración de los técnicos de cada cooperativa, realizar encuestas a sus agricultores asociados (Figura 12B).



Figura 10. (A) Cartel de difusión del proyecto expuesto en las cooperativas para captar productores para la realización de encuestas de diagnóstico. (B) Encuestas de diagnóstico.

La metodología empleada para la realización del trabajo, de acuerdo con los objetivos planteados, se especifica en las siguientes fases:

1.1. Búsqueda, recopilación, revisión y análisis de la información secundaria existente relacionada con el sector del espárrago verde,

particularmente en las principales zonas productoras de espárrago verde de España, donde los efectos ocasionados por el síndrome del decaimiento se encuentran de forma más acusada.

1.2. Obtención de la información primaria mediante diseño y realización de encuestas.

La encuesta se ejecutó a lo largo del otoño de 2017 y la primavera de 2018, a agricultores productores de espárrago verde y se estructuró en seis bloques fundamentales:

- (i) Características de la parcela
- (ii) Riego
- (iii) Características del cultivo de espárrago
- (iv) Técnicas de cultivo
- (v) Plagas y enfermedades
- (vi) Sintomatología de decaimiento.

1.3. Análisis de dicha información y obtención de resultados.

La ficha técnica del muestreo con las características del análisis realizado se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Ficha técnica del muestreo. Fuente: Elaboración propia.

Población Objeto de estudio	Agricultores residentes en España con edades iguales o superiores a 18 años.
Tamaño de la muestra	165 entrevistas.
Tipo de entrevista	Los cuestionarios se han aplicado mediante entrevista personal, cara a cara.
Tipo de muestreo	Estratificado con afijación proporcional.
Error	El nivel de error absoluto máximo esperado de los resultados de la encuesta, para las frecuencias de cada variable, es de $\pm 3,38\%$, para un nivel de confianza del 95%, 2 sigmas $p = q = 0,5$.
Fechas de trabajo de campo	A lo largo del otoño de 2017 y la primavera de 2018.

1.4 Elaboración de conclusiones. Los programas empleados en el tratamiento de datos de las encuestas, fueron Excel 2016 de Microsoft para Windows y el programa de Análisis Estadístico SPSS 24.

2. Identificación de los factores abióticos implicados en el SDE

2.1. Diseño experimental

Para ratificar la existencia de factores abióticos implicados en el SDE y tratar de identificarlos, se llevó a cabo un ensayo en la finca experimental del centro IFAPA Camino de Purchil en la provincia de Granada (37°10'18.0"N 3°38'16.6"W).



Figura 11. Fotografía aérea correspondiente al ensayo de campo del experimento 2, ubicado en el Centro IFAPA camino de Purchil de Granada.

El ensayo se estableció con tres suelos pertenecientes a dos parcelas geográficamente muy próximas y de características texturales similares:

- (a) suelo de una parcela en la que nunca se había cultivado espárrago (T1).

- (b) suelo de una parcela fuertemente afectada por el síndrome que se desinfectó con Dazomet (600 kg/ha) (T2) para eliminar los patógenos presentes.

(c) suelo de la misma parcela fuertemente afectada por el síndrome del decaimiento sin desinfectar (T3).

La distribución fue completamente aleatoria con 3 repeticiones (Figura 12).

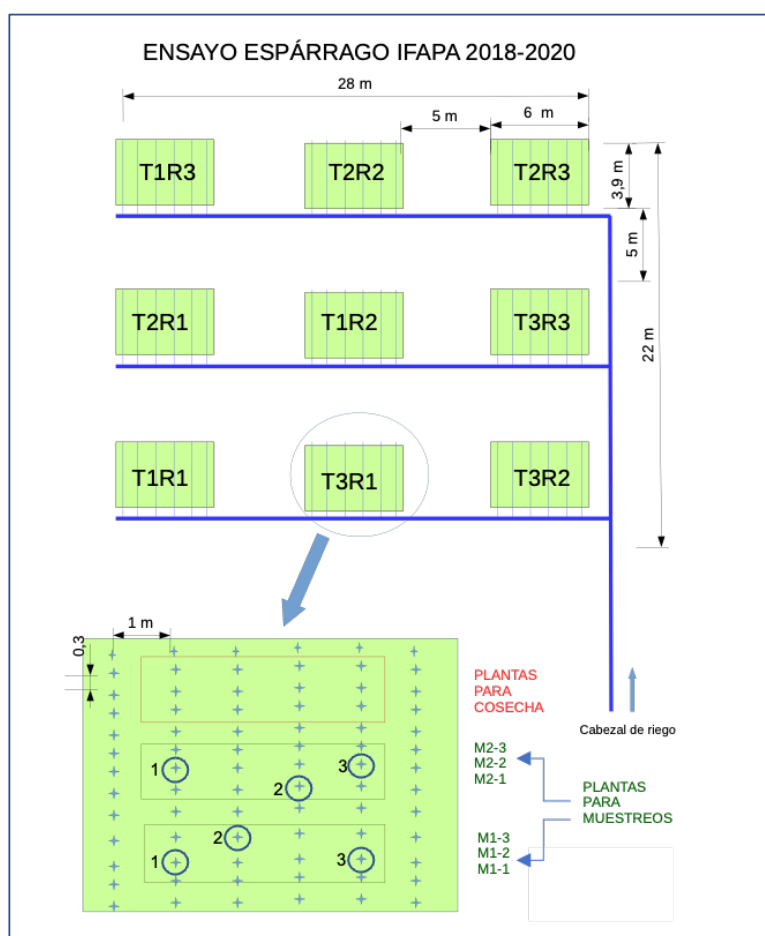


Figura 12. Croquis de ensayo. Distribución de parcelas y zonas destinadas a muestreos destructivos y cosechas. T1 suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior, T2 suelo con decaimiento desinfectado, T3 suelo con decaimiento sin desinfectar. M1 muestreos 1^{er} año, M2 muestreos 2^o año.

El suelo de T1 era el originario de la parcela de ensayo del IFAPA donde nunca se había cultivado espárrago y que llevaba más de 10 años sin cultivo.

El suelo de T2 y T3 pertenecía a una misma parcela con un cultivo de espárrago verde de 6 años de edad muy afectado por el SDE, con elevada y creciente mortandad de plantas y drástica reducción del rendimiento. El suelo aportado estaba además acompañado de restos de garras del cultivo anterior de espárragos.



Figura 13. Extracción de suelo de parcela fuertemente afectada por el síndrome del decaimiento.

Para el establecimiento del ensayo se excavaron contenedores de 6 x 4 m² y 130 cm de profundidad. Los laterales se cubrieron con plástico continuo y el fondo con plástico perforado, rellenando los 30 cm inferiores con grava para facilitar el drenaje (Figura 17).



Figura 14. Parcelas aisladas ubicadas en el IFAPA de Granada para la evaluación de diferentes tipos de suelos.

Cada contenedor se rellenó con el suelo correspondiente y las garras de espárrago (*Asparagus officinalis* L.), var. Grande se trasplantaron el 21 de mayo de 2018 (Figura 21) a una profundidad de 20 cm en un marco de 1 x 0,3 m², procedentes del vivero “Vega Niña” libres de patógenos.



Figura 15. Trasplante de Garras Var. Grande

La fertirrigación se realizó a demanda con agua subterránea procedente del acuífero de la vega de Granada, controlada por sondas de humedad (ECH20 Ec5 de Decagon Device).



Figura 16. Sistema de fertirriego bajo demanda

2.2. Análisis del material vegetal

2.2.1. Parámetros de crecimiento

2.2.1.1. Muestreos periódicos **no destructivos** para determinar la evolución en los cuatro tratamientos de los parámetros:

Se realizaron dos tipos de evaluaciones del crecimiento:

- Fitovolumen vegetal (Passera et al., 2001) que estima el volumen de las plantas a partir de la altura y el diámetro medio de las mismas;
- Índice de Área Foliar (LAI) calculado a partir de mediciones realizadas por encima y por debajo del dosel vegetal a lo largo de un tramo transversal de cada parcela elemental, utilizando un ceptómetro ACCUPAR (LP 80 de Meter Group)

2.2.1.2. Muestreos **destructivos** periódicos donde se determinaron los siguientes parámetros:

- Peso fresco total de planta

- Número y peso fresco de raíces clasificadas por tamaños
- Peso seco total de raíces
- Número, longitud y peso fresco de tallos
- Peso seco de tallos

2.2.2. Caracterización fisiológica del cultivo

Para llevar a cabo las analíticas de laboratorio se arrancaron las plantas de espárrago seleccionadas para realizar los muestreos periódicos del cultivo (Figura 17) y se separaron la parte aérea y radicular, además de coger una muestra de tierra lo más cercana posible a las raíces. Seguidamente se congelaron muestras de estas plantas cuyo muestreo ya había sido evaluado para posteriormente ser todas procesadas y analizadas en laboratorio.



Figura 17. Planta de espárrago arrancada completamente para realizar analíticas de laboratorio.

2.2.2.1. Determinación de la concentración de pigmentos fotosintéticos

La concentración de pigmentos fotosintéticos se analizó siguiendo el método de Wellburn con pequeñas modificaciones. Se maceró un total de 0,1 g de espárragos congelados en 1 mL de metanol. Posteriormente, se centrifugó durante 5 minutos a $2200 \times g$. Se midió la absorbancia a 3 longitudes de onda diferentes: 653 nm, 666 nm y 470 nm. El cálculo se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Clorofila a (Chl a)} = 15,65 \times A_{666} - 7,34 \times A_{653}$$

$$\text{Clorofila b (Chl b)} = 27,05 \times A_{653} - 11,21 \times A_{666} \quad \text{Carotenos} = (1000 \times A_{470} - 2,86 \times \text{Chl a} - 129,2 \times \text{Chl b})/221$$

En los resultados, las unidades de estos bioindicadores se expresan en miligramos por gramo de peso fresco (mg g^{-1} FW).

2.2.2.2. Extracción y análisis de fitohormonas

Las concentraciones de fitohormonas se determinaron en parte aéreas según Albacete et al. (2008) con algunas modificaciones. Las muestras liofilizadas (30 mg) se mezclaron con 1 mL de mezcla de extracción fría ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) de metanol/agua (80/20, v/v). Las muestras se centrifugaron ($20.000\times g$, 15 min, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$) y se volvieron a extraer durante 30 min a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 1 mL de la misma solución de extracción. Los sobrenadantes se pasaron por cartuchos Sep-Pak Plus $\dagger$ C18 (SepPak Plus, Waters, Milford, MA 01757 EE.UU.) y se evaporaron a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ al vacío. El residuo se disolvió en 1 mL metanol/agua (20/80, v/v) utilizando un baño ultrasónico. Las muestras disueltas se filtraron a través de filtros de membrana de nailon Millex de 13 mm de diámetro y $0,22\text{ }\mu\text{m}$ de tamaño de poro (Millipore, Bedford, MA, EE.UU.). Los extractos filtrados ($10\text{ }\mu\text{L}$) se inyectaron en un sistema U-HPLC- MS consistente en un U-HPLC de la serie Accela acoplado a un espectrómetro de masas Exactive (Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, EE.UU.) con una interfaz de ionización por electrospray calentado (HESI). Los espectros de masas se midieron utilizando el software Xcalibur versión 2.2. Para la cuantificación de las fitohormonas, se construyeron curvas de calibración (1 , 10 , 50 y $100\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$) y se corrigieron con $10\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$ de patrones internos deuterados. Las CK totales se calcularon como la suma de las concentraciones de trans-zeatina (tZ) e isopentenil adenina (iP). Los AG totales se calcularon como la suma de las concentraciones de giberelina A1 (GA1), giberelina A3 (GA3) y giberelina A4 (GA4).

2.2.2.3. Metabolismo oxidativo

2.2.2.3.1. Malondialdehído (MDA)

Para el ensayo de MDA, se homogeneizaron 0,1 g de parte aéreas en 1 ml de una solución de ácido tiobarbitúrico al 0,25% en ácido tricloroacético al 10%. La mezcla se calentó a 95 °C durante 30 minutos y luego se enfrió en un baño de hielo. Posteriormente, las muestras se centrifugaron a 9500 rpm durante 10 min. La concentración de MDA en el sobrenadante se cuantificó midiendo la absorbancia a 532 nm. Se obtuvo el valor de absorbancia no específica a 600 nm para corregir la turbidez. La concentración de MDA se calculó utilizando 155 mM⁻¹ cm⁻¹ como coeficiente de extinción (Fu y Huang, 2001).

2.2.2.3.2. Superóxido dismutasa (SOD)

La actividad de la superóxido dismutasa (SOD) se evaluó controlando la inhibición de la reducción fotoquímica del nitroazul de tetrazolio (NBT), según el método de Yu et al. (1998).

2.2.2.3.3. Peróxido de hidrógeno (H₂O₂)

Para la determinación de H₂O₂ las muestras de parte aéreas se extrajeron con acetona fría y la intensidad del color amarillo del sobrenadante se midió a 415 nm. El resultado de la concentración de H₂O₂ se expresó como µg g⁻¹ DW (Kubiś, 2008).

2.2.2.3.4. Actividad ascorbato peroxidasa (APX)

La actividad APX en extractos de parte aéreas se determinó registrando el cambio de absorbancia a 290 nm durante 3 min de una mezcla de reacción

que contenía 100 mM de tampón K-fosfato (pH 7,5), 0,5 mM de ácido ascórbico y 0,2 mM de H₂O₂ (Rao et al., 1996).

2.2.2.3.5. Ascorbato (AsA)

Para la extracción y cuantificación del AsA se siguió el método de Law et al. Este método se basa en la reducción de Fe³⁺ a Fe²⁺ por AsA en una solución ácida. Un total de 0,1 g de turión se homogeneizó en N₂ líquido con 5 mL de ácido metafosfórico al 5% (p/v) y se centrifugó a 4 °C durante 15 min. A continuación, se añadieron 0,2 mL de sobrenadante a un tubo de ensayo junto con 0,5 mL de tampón fosfato sódico 150 mM (pH 7,5) y 0,1 mL de ditioneol (DTT) 10 mM. La mezcla se agitó y se incubó a temperatura ambiente en la oscuridad durante 10 minutos. A continuación, se añadieron 0,1 mL de N-etilmaleimida al 0,5% (p/v) junto con 0,4 mL de ácido ortofosfórico al 44% (v/v), 0,4 mL de biperidilo al 2,20-4% (p/v) en etanol al 70% y 0,2 mL de FeCl₃ al 3% (p/v). La mezcla de reacción resultante se agitó y se incubó a 40°C en la oscuridad durante 40 min. Finalmente, se midió la absorbancia a 525 nm frente a una curva estándar de AsA, preparada siguiendo el mismo procedimiento.

2.2.2.3.6. Glutación (GSH)

Para la concentración de GSH, se maceró 0,1 g de turión en 1 mL de HCl 0,2 M, se centrifugó a 16.000 × g durante 10 min. Se tomó una alícuota de 500 µL seguida de la adición de 500 µL de tampón fosfato sódico (pH 7,5). Posteriormente, se tomó una alícuota de 25 µL y se vertió con 90 µL de tampón fosfato sódico, 10 µL de 10 mM EDTA, 10 µL de NADPH 10 mM, 10 µL de DTNB 6 mM, 35 µL de H₂O destilada y 10 µL de GR 10 UD por mL. La concentración de GSH se midió a 412 nm.

2.2.2.3.7. Determinación de las pruebas antioxidantes: FRAP y TEAC

El ensayo se realizó utilizando el reactivo FRAP y la absorbancia se midió a 593 nm. El ensayo TEAC (Trolox Equivalent Antioxidant Activity) se realizó utilizando una versión modificada del método de Cai et al. [30] basado en la reacción con el ácido 2,2'-azinobis-(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS) y midiendo la absorbancia a 734 nm.

2.2.2.4. Metabolismo de fenoles

2.2.2.4.1. Determinación de la concentración total de fenoles

Los fenoles del tejido vegetal se extrajeron según Rivero et al. con pequeñas modificaciones. El contenido se cuantificó a una absorbancia de 725 nm utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteu. Se molió una muestra de 0,1 g y se mezcló con 500 µL de metanol, 500 µL de cloroformo y 250 µL de NaCl al 1%. A continuación, se centrifugó durante 10 min a 5000 rpm.

2.2.2.4.2. Polifenol oxidasa (PPO)

La Polifenol oxidasa (PPO) se midió colorimétricamente según Chavan y Kamble (2014). Este método se basa en la conversión de catecol en o-quinona por la PPO. La actividad de la PPO se midió a 420 nm durante 3 minutos.

2.2.2.4.3. Determinación la composición fenólica

Se determinó la composición fenólica por métodos de HPLC-DAD de las muestras suministradas (en polvo seco/liofilizado) para cuantificar ácidos fenólicos y flavonoles. Como paso previo a la determinación analítica, las muestras se extrajeron como se detalla a continuación:

Las muestras liofilizadas se pesaron en una balanza analítica y se extrajeron con metanol:agua:fórmico (25:24:1) en una proporción de 100 mg/mL.

Las muestras de suelo se extrajeron con MeOH 80%+Trietilamina 2%

Las muestras se analizaron mediante HPLC-DAD y HPLC-DAD-ESI-MS/MS utilizando una columna C18 5u Kinetex de Phenomenex (250x4.6 mm) en un gradiente de (A) Agua + Fórmico 1% y (B) ACN 100%, para eluir los compuestos de interés de las muestras.

2.2.2.5. Determinación de la concentración de nutrientes

Las muestras se mineralizaron por el método de digestión húmeda descrito por Wolf. Para ello, se molieron 0,1 g de turiones liofilizados y se mineralizaron con 98% de H_2SO_4 y 30% de H_2O_2 a 300 °C. Los nutrientes minerales se analizaron por ICP-OES y se expresaron como mg o $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco (DW). Para el análisis de N, se digirió una muestra de 0,1 g de DW con H_2SO_4 y H_2O_2 . Después de diluirla con agua desionizada, se añadió una alícuota de 1 ml de la digestión a un medio de reacción que contenía silicato de sodio/nitroprusiato de sodio e hidróxido de sodio, y dicloroisocianurato de sodio. Las muestras se incubaron a temperatura ambiente durante 45 minutos y la concentración de N se determinó con un espectrofotómetro según Krom.

2.2.3. Cosecha y calidad

2.2.3.1. Cosecha

La cosecha se realizó durante el periodo comprendido entre febrero y marzo el primer año 2019 para evitar el agotamiento de las plantas en su primer año y entre mediados-finales de febrero hasta principios del mes de mayo en los

años 2020 y 2021. La duración de la cosecha vino determinada por las condiciones climáticas de cada año y las distintas casuísticas producidas durante este, como ocurrió con el confinamiento derivado de la pandemia por el COVID-19 en el año 2020. Se delimitó como zona de recolección el surco central de cada parcela elemental donde se realizaron recolecciones dos veces por semana, siendo los martes y jueves. Se cortaron los turiones a 24 cm (longitud comercial) y se distribuyeron en 2 grupos; comerciales y no comerciales, considerando como no comerciales los turiones fuera de tipo, cabezas abiertas, con daños producidos por insectos o mecánicos, etc.

2.2.3.2. Calidad de los turiones

Para la obtención de los parámetros de calidad de la cosecha se utilizaron los turiones cosechados en 3 momentos distintos del periodo de cosecha (inicio, intermedio y final). El muestreo se realizó coincidiendo con los periodos de máxima producción de turiones. Todos los turiones muestreados de las 3 parcelas de un tratamiento se mezclaron para obtener una muestra homogénea.

- **Peso unitario:** Se llevaron a cabo medidas directas con una balanza marca Cobos AJ-1200CE Complet (Figura 15A). Pesando individualmente todos los turiones cosechados.
- **Calibre:** Se llevó a cabo la medición del diámetro de cada turión mediante el uso de un Calibre electrónico digital marca Mitutoyo. Las mediciones se realizaron en tres puntos diferentes: la parte basal, intermedia y apical de cada turión y se realizó el promedio.
- **Dureza:** Se realizó mediante medidas directas con un penetrómetro marca T.R. Turoni Decco Iberica (100gr- 1000gr) (Figura 15B). Estas

medidas se tomaron en todos los turiones en la parte basal, intermedia y apical de cada turión y se calculó el promedio de estas.

- **Volumen:** El volumen del turión se estimó asimilando su forma a un tronco de cono. Se aplicó la siguiente ecuación:

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h \cdot (R^2 + r^2 + R \cdot r)$$

Siendo “h” la longitud total del turión, “R” el radio mayor (basal) y “r” el radio menor (apical).

- **°Brix:** Para medir la concentración total de sacarosa disuelta en el jugo extraído de los turiones de espárrago (°Brix) se utilizó un refractómetro Digital/Óptico Hanna Instruments HI 96801 (Figura 15C). Se aplicaron unas gotas del jugo extraído para medir la jugosidad y se tomaron directamente las medidas proporcionadas en la pantalla del refractómetro.

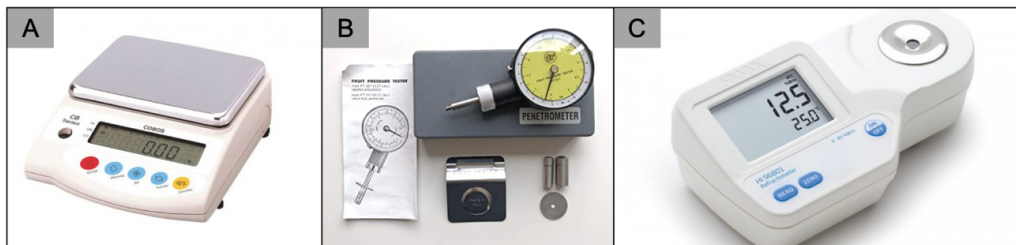


Figura 18. Instrumentos de medida: A) Báscula, B) Penetrómetro y C) Refractómetro.

- **Jugosidad:** El valor de la jugosidad se obtiene como resultado del cociente entre el volumen de jugo obtenido tras el proceso de prensado y la masa total de muestra utilizada para extraer el mismo. Este se expresa en tanto por ciento. Para su obtención, se mezclaron de forma homogénea pequeños trozos de turión seleccionados de entre todos los turiones

cosechados de cada parcela elemental. Estos se pesaron y se introdujeron en una prensa hidráulica para extraer savia de parte aéreas marca Craftsman (Figura16), para extraer su jugo.



Figura 19. Prensa hidráulica de mesa para extracción de savia.

3. Determinación de la eficacia de diferentes estrategias de control

En este trabajo únicamente se han ensayado técnicas de control de los factores bióticos implicados, puesto que los factores abióticos aún no están claros en el caso concreto del SDE en las plantaciones de España. De hecho, su detección e identificación han constituido otra parte de este trabajo.

Para este control de factores bióticos implicados se han propuesto dos métodos principales de desinfección del suelo:

- Fumigación química que es eficaz en el control de estos patógenos (Fravel et al., 2003) pero que debe verificarse en condiciones agroambientales locales.
- Aporte de enmiendas orgánicas combinado con la solarización del suelo (biosolarización), cuya eficacia sólo ha sido probada en condiciones controladas (Borrego et al., 2014).

3.1. Diseño experimental

Para el ensayo de las estrategias de control se seleccionó una parcela de la zona predominante de cultivo del espárrago en la provincia de Granada (Figura17), concretamente en la localidad de El Jau (37°11'58.4"N 3°44'23.4"W).



Figura 20. Fotografía aérea correspondientes al ensayo de campo del experimento. Parcela ubicada en El Jau.

El diseño experimental consistió en bloques completos aleatorizados con 4 tratamientos y 4 repeticiones por tratamiento, con un total de 16 parcelas. Cada parcela elemental tenía una superficie de 12 x 4,2 m² y estaba totalmente aislada, rodeada en su perímetro por un dique de riego construido en tierra de 50 cm de altura y 50 cm de ancho, para evitar la contaminación entre las distintas parcelas por el agua de riego. También estaban separadas a una distancia de 2 m entre sí.

Los tratamientos realizados fueron (Figura 21): (T1) Control sin tratar; (T2) Biofumigación con pellets de semillas de *Brassica carinata* (5.000 kg/ha), Biofence® (Triumph Italia del Grupo Ce- realtoscana, Livorno, Italia), compuesto por 6% N, 7% P₂O₅, 2,6% K₂O, 4,4% SO₃, 0,9% MgO, 84. 2% MO; (T3) Biofumigación con pellets de estiércol de gallinaza (5000 kg/ha), Riger® (Ferm o Feed, Helmond, Países Bajos), compuesto por 4% N, 3,4% P₂O₅, 3,2% K₂O,

0,9% MgO, 65% MO, 8% Ca; y (T4) Desinfección química con Dazomet (600 kg/ha), Basamid® (Certiseurope, Elche, España), compuesto por Dazomet 98%.

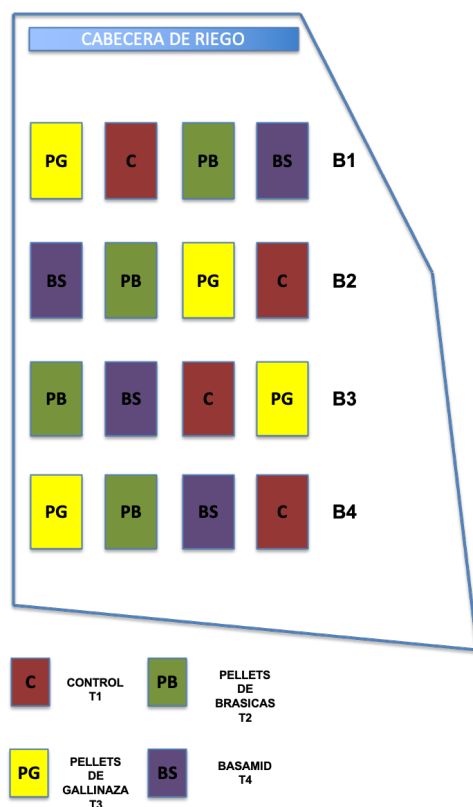


Figura 21. Diseño experimental del ensayo de desinfección ubicado en el municipio de El Jau.

La parcela elegida para la realización del ensayo mostró fuertes síntomas del síndrome de decaimiento en el cultivo anterior de espárrago, con un elevado porcentaje de plantas muertas.

El 4 de mayo de 2018 se aplicaron los tratamientos de pellets de *Brassica* y de gallinaza de forma manual y directa al suelo homogeneizando su distribución en las parcelas elementales correspondientes. Para la aplicación de Dazomet se utilizó una abonadora manual debidamente calibrada (Figura 22).



Figura 22. Realización de desinfección con Dazomet.

Posteriormente, todos los tratamientos se incorporaron al suelo mediante una labor de rotavator. Finalmente, se aplicó un riego para aumentar la humedad del suelo y las parcelas elementales se cubrieron de forma independiente con un Film Totalmente Impermeable (TIF) transparente de 120 galgas durante 25 días (Figura 23). Tras este periodo, se retiró el film y se trasplantaron las plantas de espárrago.



Figura 23. Aplicación de tratamientos y biosolarización.

Las plantas se obtuvieron de semilla, se sembraron el 7 de marzo en bandejas forestales (Figura 24) y se trasplantaron al campo el 15 de junio, con una separación de 1,3 m entre las líneas y de 0,33 m entre las plantas. El riego se realizó por inundación, a partir de agua superficial.

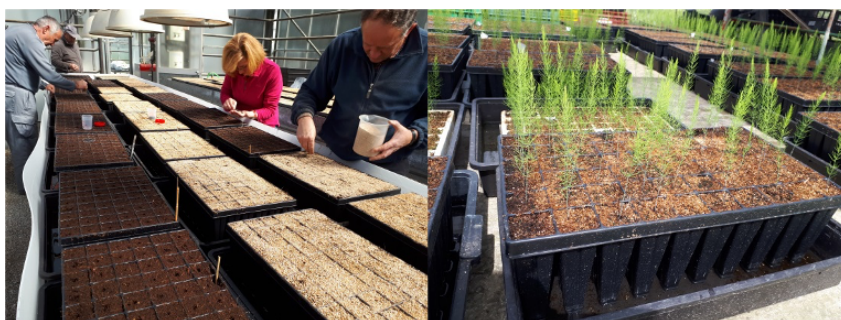


Figura 24. Semillado de espárragos en bandejas forestales

3.2. Análisis del material vegetal

3.2.1. Parámetros de crecimiento

Se llevaron a cabo los mismos muestreos periódicos no destructivos y destructivos que en el ensayo de identificación de los factores abióticos implicados en el SDE para determinar fitovolumen y LAI (Figura 25). Se ha seguido la misma metodología que en los puntos 2.2.2.1.1. y 2.2.2.1.2.



Figura 25. Toma de medidas de Interceptación de radiación (imagen izquierda) y fitovolumen (imagen derecha).

3.2.2. Caracterización fisiológica del cultivo

Para este apartado, se ha seguido la misma metodología que en el punto 2.2.2. de este documento.

3.2.3. Cosecha y calidad

Se llevaron a cabo las mismas cosechas periódicas que en el ensayo de identificación de los factores abióticos implicados en el SDE, en este caso dos a la semana (limitadas en el año 2020 por las restricciones del Covid-19), para la evaluación de la calidad de los turiones. Se ha seguido la misma metodología que en el punto 2.2.2.3. de este documento.

4. Análisis estadístico

Para evaluar las diferencias entre tratamientos, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) de una vía con un 95% de confianza. La media y el error estándar de cada tratamiento se calcularon a partir de los 9 datos individuales de cada parámetro analizado. Las medias se compararon utilizando las diferencias mínimas significativas de Fisher (LSD0,05). Los niveles de significación se indicaron como * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$, o NS (no significativo). Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa informático Statgraphics Centurion 16.1.03.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Caracterización de las explotaciones de espárragos en España.

En relación a las características de las parcelas dedicadas al cultivo de espárrago en la zona estudiada, se observa una amplia distribución geográfica, abarcando una extensa superficie agrícola. La zona más representativa en este contexto fue identificada como la Vega de Granada y Loja, abarcando un 48,5% y 26,1% respectivamente de la superficie total analizada (Tabla 4). En cuanto a la titularidad de la tierra, se destaca que la mayoría de las parcelas son de naturaleza arrendada (61,5%) (Tabla 5). Respecto a las características edáficas, los suelos predominantes son los de tipo pesado (51,1%), con una pendiente nula (61,8%) y bajos niveles de materia orgánica (58,2%) (Tabla 5). Es importante señalar que los cultivos previos a la siembra de espárrago estuvieron mayoritariamente compuestos por cereales (60,6%) (Tabla 6).

Tabla 4. Principales zonas productoras según las encuestas realizadas a los productores (%).

Termino municipal	%
Loja	26,1
Arenas del Rey	0,6
Ventorro de S. José	8,5
Huétor Tajar	9,7
Villanueva del trabuco	1,8
Vega Granada (otros)	48,5
Aranjuez	1,8
Junquera de Henares	1,8
Aranzueque	1,2

Tabla 5. Caracterización de las explotaciones según los parámetros encuestados (%): titularidad de la tierra, pendiente, tipo de suelo, niveles de materia orgánica y realización de análisis de suelo.

Titularidad de parcela	%
Arrendada	61,5
Propiedad	38,5
Pendiente	%
Nula	61,8
Ligera	34,5
Media	3,6
Tipo de suelo	%
Arenoso	28,5
Calizo	12,1
Limoso	0,6
Arcilloso	4,2
Franco Limoso	27,9
Franco Arenoso	1,2
Franco Arcilloso	20,0
Franco	5,5
Materia orgánica	%
Baja	58,2
Media	26,7
Alta	15,2
Análisis de suelo	%
Si	12,4
No	87,6

Tabla 6. Caracterización de las explotaciones según los parámetros encuestados (%): Cultivos previos al cultivo actual de espárrago.

Cultivos Anteriores	%
Esparrago	9
Patata	3,0
Ajos	1,2
Barbecho	1,2
Otros	6,1
Cereales	60,6
Tomate	1,8
Girasol	0,6
Brócoli	0,6
Maíz	5,5
Frutales	0,6
Leguminosas silvestres	9,1
Lechuga	0,7

En cuanto al manejo del riego en estas explotaciones, se evidencia que la mayoría de los agricultores optan por el riego por inundación con agua superficial proveniente de acequias, representando el 40,9% en comparación con otros sistemas de riego. Es relevante destacar que un alto porcentaje de agricultores (77,9%) no ha realizado análisis de agua para el riego. Durante el período de reposo invernal el 96,4% de los agricultores no riega, durante el periodo vegetativo, el riego es realizado quincenalmente por el 96,4% de los agricultores,

en lugar de adecuarlo a las necesidades específicas del cultivo, lo que podría afectar su desarrollo óptimo (Tabla 7).

Tabla 7. Caracterización de las explotaciones en función del manejo del riego (%): tipo de riego, realización de análisis de agua, riego durante periodo de reposo invernal del cultivo y frecuencia de riego durante el período vegetativo.

Agua de riego	%
Subterránea	16,74
Superficial	40,94
Manantial	11,24
Red abastecimiento	17,94
Otros	13,14
Análisis de agua	%
Si	77,9
No	22,1
Frecuencia riego R. invernal	%
Riega	3,6
No riega	96,4
Frecuencia riego vegetativo	%
Semanal	19,3
Quincenal	36,3
Mensual	13,3
Trimestral	12
Semestral	10,8
Anual	8,4

En relación a las características de las plantaciones de espárrago, se observa que la mayoría son de carácter joven, principalmente trasplantadas o sembradas entre los años 2011 y 2017 (68,5%) (Tabla 8). La variedad más cultivada es la variedad "Grande" (54,5%). De manera preocupante, un alto porcentaje de agricultores (86,9%) no ha desinfectado el suelo de sus parcelas, y aquellos que lo han hecho (43,7%) indican que el producto utilizado para la desinfección es superfosfato de cal, el cual no es un desinfectante de suelos (Tabla 9).

Tabla 8. Caracterización de la antigüedad de las explotaciones de espárrago (%).

Fecha plantación	% Válido
Previo a 2010	31,6
2011	5,1
2012	16,5
2013	9,5
2014	16,5
2015	7,6
2016	10,1
2017	3,2

Tabla 9. Caracterización de las explotaciones según los parámetros encuestados (%): Variedad utilizada, desinfección previa al trasplante o siembra y producto utilizado en el caso de desinfección.

Variedad	%
Grolim	12,9
Grande	54,5
Depauli	1,2
Placospes	21,2
Otros	1,8
Paulin	1,8
Vegalin	4,2
Garcilla	0,6
Rocalva	0,6
Vattentiri	0,6
Garly California	0,6
Desinfección	%
Si	13,05
No	86,95
Producto utilizado	%
Mostaza	25,7
Basamid	5,7
Dicloropropeno	12,3
Super fosfato	43,7

En lo que respecta a la adopción de prácticas ecológicas, solo el 0,8% de la superficie total destinada al cultivo de espárrago se dedica al cultivo ecológico. La eliminación de malezas se realiza principalmente de forma manual (77%). La época de recolección se concentra principalmente en marzo (60,2%), prolongándose hasta mayo (46,9%) y junio (46,3%). Tras el desbroce de la parte aérea de las plantas, los restos vegetales no son extraídos de la parcela en un 85,2%, y estos residuos no son sometidos a quemado para su eliminación en un 89,8%.

Tabla 10. Caracterización de las explotaciones de espárrago en función de: Manejo del cultivo en ecológico y tipo de escarda llevada a cabo.

Ecológico	%
Si	0,8
No	98,2
Escarda	%
Manual	77
Química	15,1
Mecánica	7,9

Tabla 11. Caracterización de las explotaciones de espárrago en función de (%): Fecha de inicio de recolección de turiones, fecha fin de recolección, restos vegetales desechados después del desbroce y quema de restos vegetales después del desbroce.

Recolección Inicio	%
Febrero	26,3
Marzo	60,2
Abril	11,7
Mayo	0,8
Recolección Fin	%
Abril	4,4
Mayo	46,9
Junio	46,3
Julio	1,4
Plantas desechadas	%
Si	14,85%
NO	85,15%
Quema plantas	%
Si	10,25%
NO	89,75%

A partir de los resultados obtenidos, se puede inferir que las prácticas de manejo en las explotaciones de espárrago no son adecuadas, lo cual puede predisponer a problemas como el encharcamiento del suelo, riego inapropiado y la falta de desinfección del agua y suelo. Estos factores podrían favorecer el

desarrollo de enfermedades fúngicas, como el *Fusarium*, considerado uno de los principales promotores del síndrome del decaimiento del espárrago. Asimismo, la acumulación de sustancias alelopáticas en el suelo debido a la presencia de restos vegetales puede ser otro factor implicado en este síndrome. La carencia de personal técnico y asesoramiento adecuado para los agricultores, evidenciada por la desinfección con superfosfato, destaca la necesidad de mejorar las prácticas de manejo y promover una gestión más sostenible y saludable del cultivo de espárrago.

2. Identificación de los factores abióticos implicados en el SDE

2.1 Parámetros de crecimiento

2.1.1. Análisis no destructivos

En este apartado, se muestran los valores obtenidos durante la fase de desarrollo vegetativo del cultivo para cuatro parámetros de crecimiento de planta: altura, fitovolumen, número de tallos e índice de área foliar, para los tres tratamientos analizados: T1, suelo sin cultivo previo de espárrago, T2, suelo con cultivo previo de espárrago con síntomas de decaimiento y desinfectado, y T3, suelo con cultivo previo de espárrago con síntomas de decaimiento sin desinfectar, en los ciclos de cultivo correspondientes a los años 2018, 2019 y 2020. (Tabla 12).

Tabla 12. Parámetros de crecimiento no destructivos de plantas de espárrago sometidas a distintos tratamientos, analizados durante los tres años del estudio (2018, 2019 y 2020).

		Altura (cm)	Fitovolumen (cm ³)	Nº de tallos	LAI (m ² m ⁻²)
2018	T1	115,83	553,81	12,08	-
	T2	132,17	520,93	10,83	-
	T3	134,67	809,13	8,42	-
	Pvalor	NS	NS	NS	
2019	T1	153,17	809,55	7,33	3,17 a
	T2	140,33	566,33	10,25	1,46 b
	T3	137,58	608,70	5,42	2,25 ab
	Pvalor	NS	NS	NS	**
2020	T1	151,50 a	754,11 a	4,83	1,63 a
	T2	87,33 b	217,51 b	3,50	0,20 b
	T3	124,17 a	476,61 ab	3,42	1,05 a
	Pvalor	**	*	NS	**

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en el año 2018 para ninguno de los tres parámetros estudiados (Tabla 12). Los valores promedio de altura fueron de aproximadamente 115.83 cm para T1, 132.17 cm para T2 y 134.67 cm para T3. Los valores promedio de fitovolumen fueron de aproximadamente 553.81 cm³ para T1, 520.93 cm³ para T2 y 809.13 cm³ para T3. Los valores promedio fueron de aproximadamente 12.08 tallos para T1, 10.83 tallos para T2 y 8.42 tallos para T3. Si existen ligeras diferencias favorables al tratamiento 3 en el caso de la altura y el fitovolumen y al T1 en el número de tallos, lo que podría indicar que la desinfección aplicada en el T2 no ha mostrado un efecto beneficioso inmediato. Esta falta de repercusión en el crecimiento puede deberse a la presencia de otros factores abióticos que están afectando a dicho desarrollo y/o a la eliminación de todos los microorganismos presentes en el suelo, que discutiremos más adelante. En el año 2019, tampoco

existen diferencias significativas entre los tratamientos en los parámetros de altura y fitovolumen, si bien se aprecia una clara tendencia de pérdida de desarrollo en los tratamientos T3 y especialmente en T2, lo que promueve la teoría de una pérdida de microorganismos beneficiosos en el suelo con la aplicación de la desinfección química. Además, si observamos el LAI medido, las diferencias sí son significativamente favorables al tratamiento T1, siendo T3 significativamente mayor que T2. En el año 2020, las diferencias significativas entre los tratamientos se mantienen, e incluso afectan al único parámetro que hasta este ciclo se había mantenido elevado en T2, el número de tallos. Este tratamiento mostró los valores más bajos en todos los parámetros evaluados, incluyendo la altura de las plantas, el fitovolumen, el número de tallos y el LAI (Tabla 12). Estos resultados respaldan la existencia de factores abióticos como corresponsables del síndrome del decaimiento del espárrago puesto que al eliminar los agentes patógenos del suelo (T2), no se ha logrado una mejora del cultivo, sino que incluso se ha producido un efecto perjudicial en su desarrollo y rendimiento con respecto al suelo con cultivo previo de espárrago y síntomas de decaimiento sin desinfectar (T1).

La bibliografía apunta a sustancias fenólicas como los agentes abióticos que contribuyen por su autotoxicidad al síndrome del decaimiento (Kato-Noguchi et al., 2017) y a la existencia de microorganismos capaces de eliminar estas sustancias fenólicas (Jiang et al., 2023). Con la desinfección, además de eliminar los agentes patógenos presentes en el suelo, es posible que se hayan eliminado estos microorganismos beneficiosos para el cultivo.

En general, los tratamientos T1 y T3 mostraron un mejor rendimiento en comparación con T2 en términos de altura de las plantas, fitovolumen, número

de tallos y LAI. La desinfección del suelo con Dazomet en el tratamiento T2 pudo haber tenido un impacto negativo en el desarrollo y rendimiento del cultivo de espárragos. Estos resultados destacan la importancia de considerar los factores abióticos como co-causantes del decaimiento, y la importancia de un manejo adecuado del cultivo para evitar el síndrome.

Por último, la Figura 26 muestra la evolución del LAI en los tres tratamientos a lo largo de los años 2019 y 2020 en que las plantas ya estaban establecidas., Se observa que el tratamiento T1 presenta un LAI significativamente mayor que los tratamientos T2 y T3 a partir de finales del mes de mayo y que esta diferencia se mantiene hasta el final del ciclo. También se comprueba que el tratamiento con desinfección (T2) permanece por debajo del tratamiento no desinfectado (T3) a lo largo de todo el ciclo en los dos años ensayados.

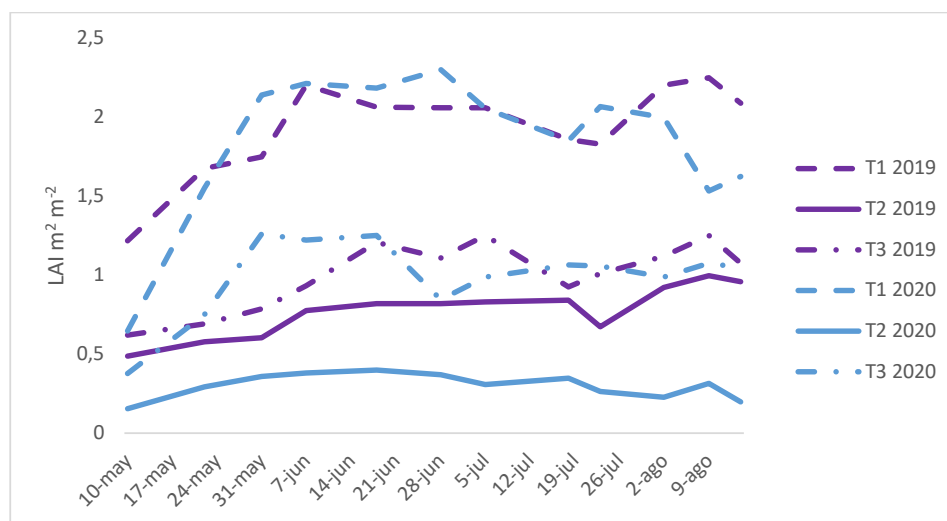


Figura 26. Evolución de LAI de plantas de espárrago sometidas a distintos tratamientos durante los años 2019 y 2020. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (T1), suelo con decaimiento desinfectado (T2), suelo con decaimiento sin desinfectar (T3).

2.1.2. Análisis Destructivos

Paralelamente a las medidas de crecimiento no destructivas, se llevaron a cabo análisis periódicos de plantas completas donde se analizaron las variables peso total de tallos (parte aérea), número de tallos, peso total de raíces, número y longitud de raíces y el contenido de materia seca en las raíces y tallos. Los valores finales de cada ciclo aparecen en las Tablas 13 y 14.

Tabla 13. Parámetros de crecimiento destructivos de parte radicular de plantas de espárrago sometidas a distintos tratamientos, analizados dos años de estudio (2019-2020).

	Raíces	Peso Total (g)	N.º Raíces <10cm	N.º	N.º Raíces >15cm	Materia Seca (%)
				Raíces 10- 15cm		
2019	T1	668 a	146 a	65 a	86 a	28 a
	T2	386 b	97 b	39 b	43 b	23 b
	T3	483 b	103 ab	50 ab	54 ab	26 a
	Pvalor	**	*	*	*	*
2020	T1	524 a	89	46	49	28
	T2	313 b	86	22	20	33
	T3	294 b	83	21	29	27
	Pvalor	*	NS	NS	NS	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

En cuanto a las raíces en el año 2019, el tratamiento T1 mostró el mayor peso total de raíces (668 g), seguido por T3 (483 g) y T2 (386 g) que fueron similares. En el año 2020, no se observaron diferencias significativas en el peso total de raíces entre los tratamientos, aunque el valor de T1 siguió siendo mayor con 524 g (Tabla 13).

En relación al número de raíces y sus longitudes, se encontraron diferencias significativas en el ciclo 2019 para las tres longitudes analizadas. El tratamiento T1 mostró el mayor número de raíces en los tres rangos de tamaño, mientras que T2 tuvo el menor número de raíces en general (Tabla 13).

En cuanto al contenido de materia seca en las raíces, también se observaron diferencias significativas sólo en 2019. Los tratamientos T1 y T3 tuvieron mayores contenidos de materia seca que T2. En 2020 no hubo diferencias entre tratamientos (Tabla 13).

Tabla 14. Parámetros de crecimiento destructivos de parte aérea de plantas de espárrago sometidas a distintos tratamientos, analizados durante dos años de estudio (2019-2020).

	Parte aérea	Peso Total (gr)	N.º Tallos	Materia Seca (%)
2019	T1	672	8	26
	T2	492	9	26
	T3	689	11	26
	Pvalor	NS	NS	NS
2020	T1	517a	3	28
	T2	279b	4	29
	T3	377b	4	27
	Pvalor	***	NS	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$, y NS (no significativo), $P > 0,05$. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

En cuanto a los tallos, se observaron diferencias en el peso total de tallos en el año 2019, siendo los tratamientos T3 y T2 muy similares (689 g y 672 g, respectivamente), con más diferencia respecto al tratamiento T1 (492 g). Sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. En el año 2020, sin embargo, sí se encontraron diferencias significativas en el peso total de tallos, siendo el peso del tratamiento T1 (517 g) superior al de los otros dos (279 g en T2 y 377 g en T3) Tabla 14.

En relación al número de tallos y al porcentaje de materia seca, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en ambos años (Tabla 14).

Los resultados concuerdan con lo obtenido en los muestreos no destructivos, corroborando el decaimiento que se produce al replantar espárrago en un suelo con cultivo anterior de la misma especie con síntomas de decaimiento (T3) en comparación con un suelo testigo de una parcela sin cultivo anterior de espárrago (T1). Así mismo se observa el efecto desfavorable de la desinfección química aplicada con solarización (T2) por la pérdida de microorganismos beneficiosos del suelo al mismo tiempo que se eliminan los patógenos.

Evolución de supervivencia de plantas

La figura 27 muestra la evolución del número de plantas vivas en los tres tratamientos a lo largo de los tres ciclos de cultivo.

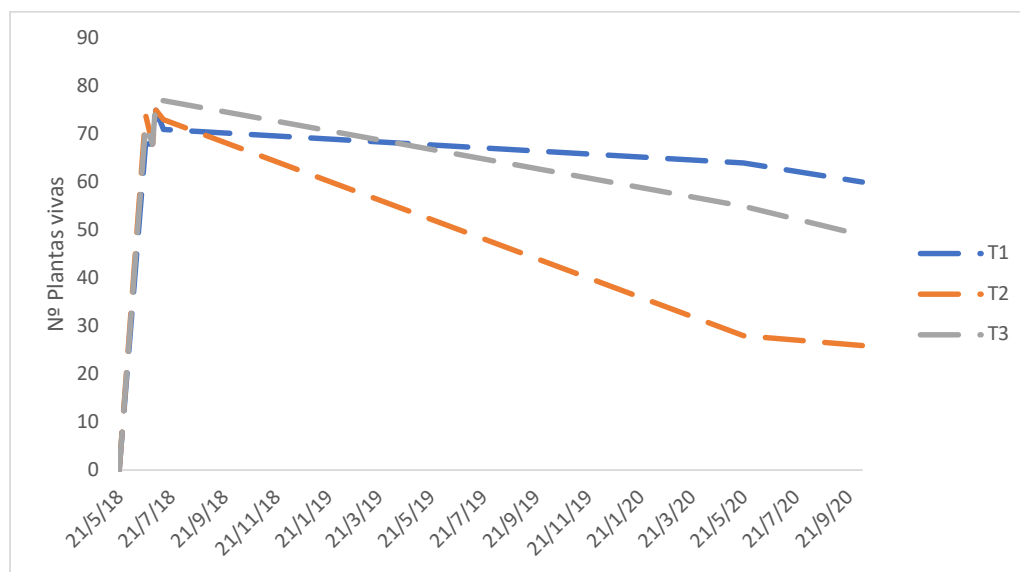


Figura 27. Evolución de la supervivencia de plantas de espárrago sometidas a distintos tratamientos T1, T2 y T3, a lo largo de tres años de ensayo (2018, 2019 y 2020).

A los 31 días desde la plantación, el 21 de junio de 2018, se produjo una pequeña cantidad de marras que fueron repuestas el mismo día. En las fechas de muestreo posteriores, el 29 de junio de 2018 y el 3 de julio de 2018, el

tratamiento T1 presenta una tendencia estable o ligeramente creciente en el número de plantas vivas, mientras que el tratamiento T2 y T3 muestran una tendencia más variable.

Sin embargo, a medida que se avanza en el tiempo, se observan cambios significativos en el número de plantas vivas, especialmente en las fechas de muestreo posteriores (21 de mayo de 2020 y 7 de octubre de 2020). En estas fechas, el tratamiento T1 muestra una disminución en el número de plantas vivas, alcanzando un valor de 60 en la última fecha de muestreo. Por otro lado, los tratamientos T2 y T3 muestran una disminución más drástica en el número de plantas vivas, con valores que disminuyen significativamente a 26 y 49 respectivamente en la última fecha de muestreo.

Estos resultados sugieren que los tratamientos aplicados tienen un efecto significativo en la supervivencia de las plantas de espárrago:

- Tratamiento T1 (suelo sin cultivo previo): En general, las plantas en el tratamiento T1 mostraron una menor mortalidad en comparación con los otros tratamientos, con una pérdida de un 23% de plantas muertas al final de los tres ciclos. Esto puede deberse a que el suelo utilizado en T1 era originario de una parcela sin cultivo de espárrago durante más de 10 años, por lo que el suelo presentaba una menor presencia de especies patógenas para espárrago y una ausencia total de las sustancias secretadas por las plantas de esta especie con posible efecto autotóxico.
- Tratamiento T2 (suelo desinfectado): En contraste con T1, las plantas en el tratamiento T2 mostraron una mortalidad muy elevada

con un 67% de plantas muertas al terminar el ciclo de 2020. Esto podría interpretarse por dos efectos: por un lado, el suelo acumulaba una cierta cantidad de las sustancias autotóxicas secretadas por las raíces de las plantas de espárrago precedentes. Por otro lado, si bien la desinfección del suelo con Dazomet pretendía eliminar los agentes patógenos para espárrago presentes en el suelo, esta práctica puede haber afectado negativamente al resto de microbiota del suelo, incluidos los microorganismos beneficiosos que ayudan en la protección contra patógenos promotores del SDE, o también contribuyendo en la descomposición de las sustancias autotóxicas mencionadas, con lo que promueven un crecimiento más saludable de las plantas. Además, el suelo desinfectado también puede haber perdido parte de su capacidad de retención de nutrientes esenciales, lo que podría haber debilitado el desarrollo de las plantas y aumentado su vulnerabilidad a enfermedades (Yeqing et al., 2018).

- Tratamiento T3 (suelo sin desinfectar): Las plantas en el tratamiento T3, contrariamente a lo esperado, mostraron una mortalidad intermedia en comparación con T1 y T2, con un 38% de plantas muertas al final de los tres ciclos. El suelo en T3, al igual que el T2, provenía de una parcela con un cultivo de espárragos previo muy afectado por el síndrome del decaimiento con presencia incluso de restos de garras del cultivo anterior de espárragos. Esto podría haber producido una acumulación de patógenos y de las sustancias autotóxicas mencionadas. Cabría esperar una

mortandad superior a la del T2 donde hemos eliminado los patógenos, pero como ya se ha citado, la desinfección también ha tenido un efecto desfavorable que ha superado incluso el producido por los propios patógenos.

2.2. Caracterización fisiológica

2.2.1. Pigmentos

La composición de pigmentos, como las clorofilas y los carotenoides, es un indicador clave del estado fisiológico y la capacidad fotosintética de las plantas de espárrago. En este estudio, se evaluaron los niveles de clorofila total, la relación clorofila a/b y los carotenoides en respuesta a diferentes tratamientos, considerando el síndrome del decaimiento del espárrago y sus posibles causantes (Tabla 15).

Tabla 15. Concentración de clorofilas, ratio clorofila a/b y concentración de carotenoides en plantas de espárrago, sometidas a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Pigmentos		Chls Totales mg/g PF	Chl a/b	Carotenoides mg/g PF
2020	T1	0,24	1,93	0,081
	T2	0,25	2,01	0,081
	T3	0,25	2,06	0,081
	Pvalor	NS	NS	NS
2021	T1	0,25	1,93	0,090ab
	T2	0,26	2,05	0,095a
	T3	0,23	1,96	0,081b
	Pvalor	NS	NS	*

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P < 0,05, ** P < 0,01, *** P < 0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

Los resultados revelaron que los niveles de clorofila total se mantuvieron constantes en los tres tratamientos a lo largo de los dos años de estudio (Tabla 15). Esto indica que la capacidad de captura de luz y la producción de pigmentos fotosintéticos no se vieron significativamente afectadas por la presencia del síndrome del decaimiento. Estos hallazgos son consistentes con otros estudios que han reportado que los niveles de clorofila se mantienen estables incluso en condiciones de estrés biótico (Pinior et al., 2005).

La relación clorofila a/b, que es un indicador de la eficiencia fotosintética y la adaptación de las plantas a diferentes condiciones ambientales, también se mantuvo estable en los tratamientos evaluados. No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos T1, T2 y T3 en cuanto a esta relación. Estos resultados sugieren que las plantas de espárrago tienen la capacidad de mantener un equilibrio en la proporción de clorofila a y clorofila b, independientemente de la presencia del síndrome del decaimiento del espárrago.

En cuanto a los carotenoides, se encontró que los niveles se mantuvieron constantes en los tratamientos T1 y T3 a lo largo de los dos años de estudio. Sin embargo, en el tratamiento T2, se observó un ligero aumento en los niveles de carotenoides en el segundo año en comparación con el primer año (Tabla 15). Estos resultados podrían indicar una respuesta adaptativa de las plantas a la presencia del síndrome del decaimiento del espárrago, ya que los carotenoides desempeñan un papel crucial en la protección de las plantas contra el estrés oxidativo y la fotoinhibición (Levin et al., 2023).

En conclusión, los resultados obtenidos en cuanto a la composición de pigmentos en los tratamientos evaluados sugieren que las plantas de espárrago tienen la capacidad de mantener niveles estables de clorofila y carotenoides, independientemente de la presencia del síndrome del decaimiento del espárrago. Estos hallazgos indican la capacidad de adaptación y resistencia de las plantas de espárrago a condiciones estresantes. Sin embargo, es importante realizar investigaciones adicionales para comprender mejor los mecanismos subyacentes y la respuesta de los pigmentos en situaciones específicas de estrés biótico.

2.2.2. Hormonas

Las hormonas vegetales son compuestos estructuralmente diversos que participan en múltiples procesos, como el control del crecimiento de la planta, el desarrollo, senescencia y respuesta al estrés. Así, las auxinas, como el ácido indolacético (AIA), y las giberelinas (GA) son un grupo de fitohormonas que regulan los procesos de desarrollo en plantas como la elongación celular, expansión de la parte aérea, alargamiento del tallo y la germinación. Además, en este grupo de hormonas del crecimiento, las citoquininas, tales como la trans-zeatina (tZ) e isopentenil adenina (iP), controlan los procesos de crecimiento y desarrollo a través especialmente de la proliferación celular, germinación de semillas y movilización de nutrientes. Por otra parte, existen un grupo de hormonas definidas como de estrés que incrementan su concentración en condiciones adversas de crecimiento. Así, el ácido abscísico (ABA), el etileno y su precursor el ácido aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), son consideradas hormonas indicadoras de la presencia y de las respuestas al estrés, regulando procesos como la abscisión de la parte aérea, la generación de ROS y la senescencia. Finalmente, el ácido jasmónico y el ácido salicílico, aunque más relacionadas con la presencia de estrés bióticos, son hormonas que también participan en la regulación y/o generación de señales de resistencia ante diferentes estreses abióticos (Blaacutierrez et al., 2020).

En este apartado, se presentan los niveles de diversas hormonas estudiadas en la parte aérea y radicular de las plantas de espárrago durante los años 2020 y 2021, en tres tratamientos diferentes (T1, T2, T3) (Tablas 16 y 17).

En primer lugar, es importante destacar que la mayoría de las hormonas analizadas no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos

estudiados en ambas partes de la planta y en ambos años (Tablas 16 y 17). Estos resultados sugieren que, en general, el perfil hormonal en la parte aérea y radicular del espárrago no se vieron afectados por los factores investigados en este estudio. Esto podría indicar que los tratamientos aplicados no tuvieron un impacto significativo en la síntesis, transporte o metabolismo de las hormonas analizadas.

En la parte radicular durante el año 2020, se encontraron diferencias significativas en el parámetro ACC entre los tratamientos T1, T2 y T3 (Tabla 16). Las raíces de las plantas de los tratamientos T2 y T3 mostraron menores niveles de ACC en comparación con las plantas de T1 (Tabla 16). Esto podría indicar un mayor transporte de ACC a la parte aérea donde podría convertirse en etileno, ya que el ACC es un precursor de esta hormona, que desempeña un papel importante en la respuesta al estrés y el desarrollo de las plantas (N. Iqbal et al., 2013). Estas diferencias podrían indicar variaciones en la producción de etileno y su implicación en la respuesta del espárrago a los factores estudiados.

En el año 2021, se observaron diferencias significativas en el parámetro ABA en la parte radicular entre los tratamientos. En concreto se observan mayores niveles de ABA en las raíces del tratamiento T2 (Tabla 16). El ABA es una hormona clave en la respuesta al estrés y la regulación del crecimiento de las plantas (Amjad et al., 2014). Las diferencias encontradas en los niveles de ABA podrían reflejar respuestas adaptativas del espárrago a los factores estudiados, como el estrés hídrico o la presencia de patógenos.

Tabla 16. Concentración de fitohormonas en parte radicular de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Hormonas (ng/g PS)												
Parte radicular	Ácido Indolacético	trans-Zeatina	Ribósido de Zeatina	Isopentenil Adenina	GA1	GA3	GA4	ACC	ABA	Ácido Jasmónico	Ácido Salicílico	
2020	T1	4,47	74,24	ND	12,56	ND	ND	0,56	265,15 a	1,89	186,27	299,05
	T2	5,48	80,92	ND	15,21	ND	ND	1,12	200,84 b	1,40	185,79	328,38
	T3	4,64	74,25	ND	9,83	ND	ND	1,40	193,78 b	1,19	186,57	338,85
Pvalor	NS	NS	-	NS	-	-	NS	*	NS	NS	NS	NS

2021	T1	6,13	69,56	ND	14,25	ND	ND	0,41	229,07	0,79 b	11,137	289,40
	T2	7,69	84,15	ND	10,60	ND	ND	0,51	180,61	1,50 a	11,52	338,92
	T3	7,32	83,46	ND	10,86	ND	ND	0,35	161,57	0,84 b	8,67	299,35
Pvalor	NS	NS	-	NS	-	-	NS	NS	*	NS	NS	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P> 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. ND (No detectado). Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo período anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

Tabla 17. Concentración de fitohormonas en parte aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Hormonas (ng/g PS)											
Parte aérea	Ácido Indolacético	trans-Zeatina	Ribósido de Zeatina	Isopentenil Adenina	GA 1	GA 3	GA4	ACC	ABA	Ácido Jasmonico	Ácido Salicílico
2020	T1	5,17	12,36	ND	3,76	ND	ND	0,02	20,01	47,45	52,61
	T2	5,28	9,54	ND	3,71	ND	ND	0,04	26,34	51,68	48,00
	T3	4,93	8,94	ND	5,08	ND	ND	0,04	24,67	41,22	36,03
Pvalor	NS	NS	-	NS	-	-	NS	NS	NS	NS	NS

2021	T1	7,74	9,21	ND	4,00	ND	ND	0,30	13,30 b	35,09	49,03
	T2	7,38	8,41	ND	4,40	ND	ND	0,35	17,52 a	33,10	51,16
	T3	8,04	8,84	ND	3,13	ND	ND	0,31	21,01 a	32,26	52,14
Pvalor	NS	NS	-	NS	-	-	NS	***	NS	NS	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P> 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. ND (No detectado). Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo período anterior (T1), suelo con decaimiento desinfectado (T2), suelo con decaimiento sin desinfectar (T3).

En la parte aérea del espárrago durante el año 2020, no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos T1, T2 y T3 (Tabla 17). En el año 2021 se observaron mayores niveles de ACC en las plantas de los tratamientos T2 y T3 en comparación con las plantas del tratamiento T1. Los mayores niveles de ACC a su vez darían lugar mayores niveles de etileno, lo que indicaría un mayor estrés en estas plantas pudiendo estar relacionado con la menor biomasa y menor supervivencia de plantas de los tratamientos T2 y T3 (Tabla 14); (Figura 27).

En resumen, si bien la mayoría de los parámetros hormonales no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos, se identificaron variaciones significativas en ACC y ABA en diferentes condiciones. Estas diferencias pueden tener implicaciones en el crecimiento, desarrollo y respuesta del espárrago a los factores investigados. Al considerar las diferencias observadas en los parámetros hormonales, el tratamiento T2 destaca por mostrar niveles más altos de ACC en la parte aérea (Tabla 17). Estos hallazgos sugieren que el tratamiento T2 puede tener un efecto negativo en el crecimiento y desarrollo del espárrago. El hecho de que haya más niveles de ACC y ABA en los tratamientos afectados por el síndrome del decaimiento sugiere que hay un mayor estrés en estas plantas (Amjad et al., 2014). Lo que coincide con la menor producción y supervivencia de las plantas de estos tratamientos al estar sometidas al SDE (Tabla 13); (Figura 27).

2.2.3. Metabolismo oxidativo

En este apartado, se analizarán diversos parámetros relacionados con el estrés oxidativo en las plantas de espárrago. El estrés oxidativo es un desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés) y la capacidad de la planta para neutralizar y detoxificar estos compuestos. Este desequilibrio puede resultar en daño celular y afectar negativamente el crecimiento, desarrollo y calidad de las plantas (Saed-Moucheshi et al., 2014).

En el estudio se evaluarán marcadores bioquímicos clave, como la actividad de enzimas antioxidantes, la acumulación de metabolitos antioxidantes y la peroxidación lipídica, para comprender mejor la respuesta de las plantas de espárrago al estrés oxidativo en diferentes tratamientos. Estos parámetros proporcionarán información importante sobre la capacidad de las plantas para resistir el estrés oxidativo y su posible relación con la calidad de las plantas.

El análisis detallado de estos parámetros nos permitirá obtener una visión más completa de la respuesta antioxidante y el nivel de estrés oxidativo en las plantas de espárrago, lo que ayudará a identificar tratamientos o condiciones que promuevan una mayor tolerancia al estrés y una mejor calidad de los cultivos.

2.2.3.1. Malondialdehído (MDA)

Se evaluaron los niveles de MDA en las raíces y parte aéreas de las plantas de espárrago en los diferentes tratamientos ensayados durante el primer y segundo año de investigación (tabla 18). El MDA es un indicador de estrés oxidativo y daño en las membranas celulares debido a la peroxidación lipídica (Marnett, 1999). Los resultados obtenidos revelan diferencias significativas en los niveles de MDA entre los tratamientos y los tejidos evaluados.

Tabla 18. Valores de concentración de MDA en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Malondialdehído (MDA)		Raíz mol/g PF	Parte aérea mol/g PF
2020	T1	15,10 b	12,79
	T2	18,80 a	13,47
	T3	21,79 a	13,47
	Pvalor	***	NS
2021	T1	21,22	17,86 b
	T2	20,63	20,13 a
	T3	19,17	16,64 b
	Pvalor	NS	***

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

En el primer año, se observaron diferencias significativas en los niveles de MDA en las raíces de las plantas sometidas a diferentes tratamientos. El tratamiento T3 mostró el nivel más alto de MDA en las raíces, seguido por el tratamiento T2, mientras que el tratamiento T1 exhibió el nivel más bajo de MDA. En cuanto a las parte aéreas, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en los niveles de MDA (Tabla 18).

En el segundo año, por el contrario, solo se observaron diferencias significativas en los niveles de MDA en la parte aérea de las plantas. En las raíces, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, lo que indica una respuesta similar al estrés oxidativo en este tejido. Sin embargo, en la parte aérea, se observaron diferencias significativas en los niveles de MDA entre los tratamientos. El tratamiento T2 mostró el nivel más alto de MDA en la parte aérea, seguido por el tratamiento T3, mientras que el tratamiento T1 exhibió el nivel más bajo de MDA (Tabla 18). Estos resultados indican una respuesta diferencial al estrés oxidativo en la parte aérea según el tratamiento que se trate.

El aumento en los niveles de MDA indica un mayor estrés oxidativo y daño en las membranas celulares. En este sentido, los tratamientos T2 y T3, que mostraron niveles más altos de MDA en comparación con el tratamiento T1, podrían indicar un mayor estrés oxidativo en las plantas de espárrago. Esto sugiere que el tratamiento T1 podría haber promovido una respuesta más efectiva contra el estrés oxidativo y una menor peroxidación lipídica, lo que potencialmente contribuyó a una mejor salud y calidad de las plantas. En cambio, los tratamientos T2 y T3 parecen promover un mayor estrés en las plantas, lo que refleja una menor producción de biomasa y supervivencia de plantas (Tabla 13 y 14); (Figura 27).

2.2.3.2. Superóxido dismutasa (SOD)

La enzima superóxido dismutasa (SOD) es una de las principales enzimas antioxidantes presentes en las plantas. Su función principal es proteger a las células contra los efectos perjudiciales de los radicales libres y el estrés oxidativo. La SOD cataliza la conversión del superóxido (O_2^-) en peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y oxígeno (O_2), lo que ayuda a prevenir el daño oxidativo en las células y tejidos. La actividad de la SOD es crucial para mantener un equilibrio redox adecuado y preservar la integridad celular en diversas condiciones fisiológicas y patológicas (Bowler et al., 1992).

Los resultados de la actividad de la enzima SOD en las raíces de las plantas de espárrago no revelaron diferencias significativas entre los tratamientos T1, T2 y T3 en ambos años de estudio. Por el contrario, en ambos años de estudio en parte aéreas los tratamientos T2 y T3 presentaron las máximas actividades (Tabla 19), por lo que la formación de H_2O_2 en estos tratamientos a priori será mayor. Estos resultados nos indican claramente una

mayor formación del anión superóxido en los tratamientos T2 y T3. En estos tratamientos el aumento de la actividad SOD refleja claramente una mayor situación de estrés ya que la SOD es definida como la primera barrera de protección enzimática frente a la generación de ROS (Ahmad et al., 2010).

Tabla 19. Valores de concentración de la actividad SOD en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Super Oxido Dismutasa (SOD)		Raíz U/mg prot	Parte aérea U/mg prot
2020	T1	0,25	0,057 b
	T2	0,26	0,073 a
	T3	0,22	0,070 a
	Pvalor	NS	*
2021	T1	0,23	0,038 b
	T2	0,22	0,043 a
	T3	0,23	0,043 a
	Pvalor	NS	*

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

2.2.3.3. Peroxido de Hidrógeno (H₂O₂)

El H₂O₂ es una ROS que se genera como resultado del metabolismo normal de las plantas y como respuesta al estrés ambiental. Su acumulación puede ser indicativa de un aumento en el estrés oxidativo y la respuesta de defensa de las plantas (Ahanger et al., 2017).

En el primer año del estudio, se observaron diferencias significativas en los niveles de H₂O₂ entre los tratamientos en las raíces y las parte aéreas. En las raíces, el tratamiento T1 mostró el mayor contenido de H₂O₂, seguido por el tratamiento T2 y luego el T3. Al contrario, en la parte aérea el tratamiento T3 presentó el nivel más alto de H₂O₂, seguido por el T2 y el T1 (Tabla 20).

Tabla 20. Valores de concentración de H₂O₂ en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

H ₂ O ₂		Raíz μg/g PF	Parte aérea μg/g PF
2020	T1	47,38 a	19,43 b
	T2	22,81b	45,13 a
	T3	17,84b	50,98 a
	Pvalor	***	**
2021	T1	40,56	22,82 b
	T2	41,75	65,78 a
	T3	35,50	56,64 a
	Pvalor	NS	**

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

En el segundo año, se encontraron diferencias significativas en los niveles de H₂O₂ entre los tratamientos en la parte aérea, pero no en las raíces. En la parte aérea, tanto el tratamiento T2 como el T3 mostraron niveles más altos de H₂O₂ en comparación con el T1 (Tabla 20).

Estos resultados sugieren que los tratamientos T2 y T3 pueden inducir un aumento en los niveles de H₂O₂ en la parte aérea, lo que puede ser indicativo de un mayor estrés oxidativo en las plantas de espárrago. Por otro lado, el tratamiento T1 mostró niveles más bajos de H₂O₂ en la parte aérea (Tabla 20).

Es importante destacar que el equilibrio entre la producción y eliminación de H₂O₂ es crucial para la respuesta antioxidante y la protección de las plantas contra el estrés oxidativo. Un exceso de H₂O₂ puede resultar en daño celular y afectar negativamente la calidad de las plantas.

En general, los resultados de la tabla de MDA y H₂O₂ indican que los tratamientos T2 y T3 pueden haber desencadenado respuestas de estrés oxidativo en las plantas de espárrago, con un mayor daño oxidativo y

acumulación de ROS. Por otro lado, el tratamiento T1 mostró una menor acumulación de MDA y H_2O_2 , lo que puede ser indicativo de una mejor protección antioxidante en estas plantas y de una menor inducción de condiciones de crecimiento adversas.

2.2.3.4. Ascorbato peroxidasa (APX)

Además de la SOD, se analizó también la actividad de la enzima APX. La APX es una enzima antioxidante clave involucrada en la respuesta de defensa de las plantas contra el estrés oxidativo y su función es la detoxificación de H_2O_2 en ciclo ascorbato-glutación. El ascorbato peroxidasa utiliza como poder reductor el ascorbato para producir la detoxificación del peróxido de hidrógeno transformándolo en agua, y es una de las enzimas clave cuya inducción suele producir una mejora de la resistencia de las plantas ante condiciones adversas de crecimiento (Navarro-León et al., 2020; Nxele et al., 2017). Los resultados obtenidos revelan diferencias significativas en los niveles de APX entre los tratamientos y los tejidos evaluados.

Tabla 21. Actividad APX en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Ascorbato Peroxidasa (APX)		Raíz ($\Delta Abs \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ prot}$)	Parte aérea ($\Delta Abs \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ prot}$)
2020	T1	0,238 a	0,088 a
	T2	0,235 a	0,060 b
	T3	0,193 b	0,068 b
	Pvalor	*	*
2021	T1	0,025	0,057 a
	T2	0,027	0,062 a
	T3	0,035	0,049 b
	Pvalor	NS	*

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$, y NS (no significativo), $P > 0,05$. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (T1), suelo con decaimiento desinfectado (T2), suelo con decaimiento sin desinfectar (T3).

En el primer año, se observaron diferencias significativas en los niveles de APX en las raíces y parte aérea de las plantas sometidas a diferentes tratamientos. El tratamiento T1 mostró el nivel más alto de APX en las raíces y en la parte aérea, mientras que los tratamientos T2 y T3 exhibieron niveles más bajos especialmente en la parte aérea (Tabla 21). Estos resultados sugieren una respuesta diferencial de la enzima APX en función de los tratamientos aplicados.

En el segundo año, no se encontraron diferencias significativas en la actividad APX radicular, mientras que en la parte aérea observamos una reducción significativa de la actividad APX en el tratamiento T3 (Tabla 21).

Es importante destacar que los niveles de APX pueden ser indicadores de la capacidad antioxidante y la respuesta al estrés oxidativo en las plantas. Un aumento en los niveles de APX se asocia generalmente con una mayor resistencia al estrés oxidativo y una mejor capacidad de recuperación de las plantas (Dietz, 2016). En este sentido, el tratamiento T1, que mostró los niveles más altos de APX en el primer año tanto en las raíces como en la parte aérea, podría indicar una mayor capacidad de defensa antioxidante en estas plantas. Esto sugiere que el tratamiento T1 podría haber promovido una respuesta más efectiva al estrés oxidativo, lo que potencialmente contribuyó a un mejor rendimiento y calidad en las plantas de espárrago.

Los resultados destacan que los tratamientos T2 y T3 provocaron una mayor acumulación de MDA y H_2O_2 en comparación con el tratamiento T1, lo que indica un mayor estrés oxidativo en las plantas de espárrago. Fundamentalmente en la parte aérea el primer y segundo año en T2 y T3 lo que explicaría el aumento en estos tratamientos del H_2O_2 y de la peroxidación de

lípidos (MDA), y por lo tanto de un mayor grado de estrés que explicaría la reducción de la biomasa reducida.

2.2.3.5. Ascorbato (AsA)

El ascorbato desempeña un papel crucial en las plantas, ya que actúa como un antioxidante y participa en diversas funciones fisiológicas. Una de las vías más importantes en las que el ascorbato se involucra es el ciclo ascorbato-glutatión Figura 28. Este ciclo es esencial para el mantenimiento del equilibrio redox y la protección contra el estrés oxidativo en las células vegetales. El ascorbato desempeña un papel integral en la protección y el mantenimiento del metabolismo redox en las plantas, garantizando su crecimiento y desarrollo adecuados en condiciones de estrés oxidativo (Burri et al., 2017).

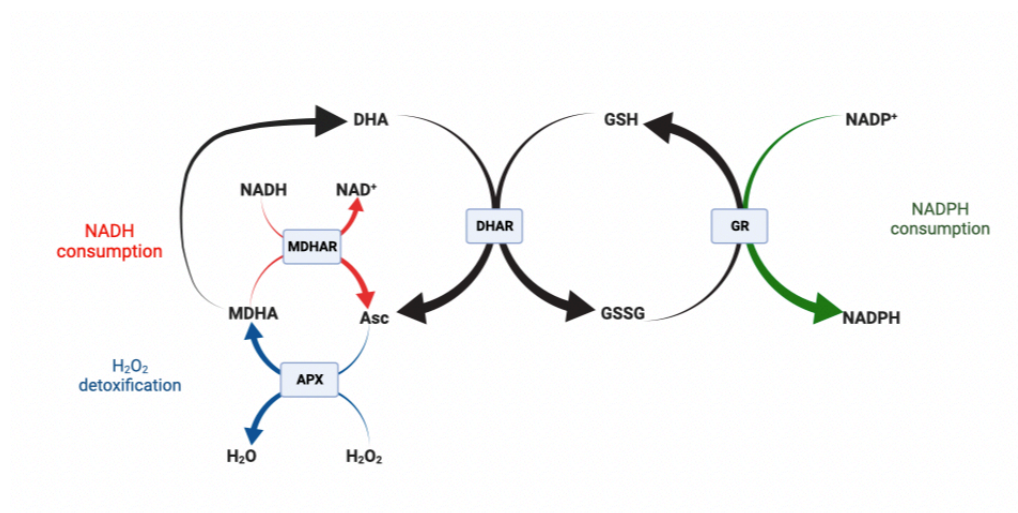


Figura 28. Ciclo ascorbato-glutatión (Halliwell-Asada).

En relación al Ascorbato Total, se observan diferencias significativas entre los tratamientos y las partes de la planta. En el primer año, se encontró que el tratamiento T3 presentó una concentración más alta de ascorbato total en

comparación con los tratamientos T1 y T2. Por el contrario, la concentración de AsA total en el segundo año en raíces y parte aérea disminuyó especialmente en el tratamiento T3, lo que sugiere una reducción de la capacidad antioxidante en este tratamiento (Tabla 22).

Tabla 22. Valores de concentración de AsA total en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

AsA Total		Raíz mg/g PF	Parte aérea mg/g PF
2020	T1	0,31 b	0,14
	T2	0,30 b	0,15
	T3	0,40 a	0,14
	Pvalor	***	NS
2021	T1	0,35 a	0,16 a
	T2	0,23 b	0,15 a
	T3	0,21 b	0,11 b
	Pvalor	***	**

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

En resumen, los resultados indican que el tratamiento T3 en el primer año exhibe una mayor capacidad antioxidante en términos de la concentración de ascorbato total en comparación con los tratamientos T1 y T2. En el segundo año los tratamientos T2 y T3 se presentó una reducción significativa de este compuesto antioxidante Tabla 22. Estos resultados coinciden con la menor actividad APX (Tabla 21) y el mayor estrés oxidativo con valores de MDA y H2O2 superiores en estos tratamientos (Tablas 18 y 20)

En nuestro estudio, observamos una mayor actividad de APX del tratamiento T1 en comparación con los tratamientos T2 y T3. Esto sugiere una respuesta antioxidante más activa en las plantas del tratamiento T1. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas que han demostrado una estrecha relación entre la actividad de la APX y los niveles de ascorbato en plantas

sometidas a estrés oxidativo (Ishikawa & Shigeoka, 2008). Por lo tanto, es probable que la mayor actividad de APX del tratamiento T1 esté asociada con niveles más altos de ascorbato total en estas plantas.

2.2.3.6. Glutathion (GSH)

El glutathion juega un papel crucial en las plantas al participar en el ciclo ascorbato-glutathion, una vía metabólica esencial para el equilibrio redox y la defensa antioxidante. En este ciclo, el glutathion se presenta en su forma reducida (GSH) y se oxida a su forma oxidada (GSSG) al donar electrones al ascorbato. A través de esta interacción, el glutathion regenera el ascorbato reducido, permitiendo que este último continúe su función antioxidante y protectora. Además, el glutathion tiene una capacidad intrínseca para neutralizar los radicales libres y otros compuestos oxidantes, protegiendo así a las plantas del estrés oxidativo. En conjunto, el papel del glutathion en el ciclo ascorbato-glutathion es vital para mantener el equilibrio redox en las células vegetales y garantizar una respuesta eficiente ante las condiciones ambientales desfavorables (Barrameda-Medina et al., 2014; Cuypers et al., 2001).

Los resultados obtenidos para el contenido total de glutathion reducido (GSH) muestran variaciones mínimas solamente en las raíces de las plantas de espárrago. En el primer año, no se observaron diferencias significativas en el contenido de GSH entre los tratamientos en ninguna de las partes de la planta. Sin embargo, en el segundo año, se encontraron diferencias significativas en el contenido de GSH en las raíces. El tratamiento T1 mostró el contenido más alto de GSH, seguido por el tratamiento T2, mientras que el tratamiento T3 mostró el contenido más bajo de GSH en las raíces. En cuanto a las partes aéreas, no se

encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en ambos años (Tabla 23).

Tabla 23. Valores de concentración de GSH total en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

GSH Total		Raíz mg/g PF	Parte aérea mg/g PF
2020	T1	0,140	0,234
	T2	0,125	0,198
	T3	0,153	0,271
	Pvalor	NS	NS
2021	T1	0,073a	0,313
	T2	0,051b	0,250
	T3	0,054ab	0,334
	Pvalor	*	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P < 0,05, ** P < 0,01, *** P < 0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

2.2.3.7. Test antioxidantes (FRAP y TEAC)

Los test antioxidantes FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) y TEAC (Trolox Equivalent Antioxidant Capacity) son ampliamente utilizados en estudios de plantas para evaluar la capacidad antioxidante de muestras vegetales. El test FRAP se basa en la capacidad de reducir el hierro férrico a ferroso en presencia de un agente reductor, reflejando así la capacidad antioxidante total de la muestra. Por otro lado, el test TEAC mide la capacidad de neutralizar radicales libres en comparación con el Trolox, un análogo sintético de la vitamina E. Ambos test permiten cuantificar la capacidad antioxidante de las plantas y proporcionar información sobre su capacidad para neutralizar especies reactivas de oxígeno y proteger contra el estrés oxidativo. Estas técnicas son herramientas útiles para evaluar la salud y el estado antioxidante de las plantas, así como para investigar los efectos de diferentes factores ambientales o tratamientos en su respuesta antioxidante (Becker et al., 2004; El-Gengaihi et al., 2014; Gavahian et al., 2022).

Los resultados obtenidos de los análisis realizados para el estudio de los parámetros FRAP y TEAC proporcionan información importante sobre la capacidad antioxidante de las plantas de espárrago y su respuesta al estrés oxidativo (Tabla 24). En primer lugar, los valores más altos de FRAP en el tratamiento T1 en las raíces indican una mayor concentración de compuestos antioxidantes que pueden neutralizar los radicales libres y proteger a las células vegetales del daño oxidativo. Esto sugiere la presencia de metabolitos antioxidantes como polifenoles y ascorbato en el tratamiento T1. Por otro lado, la capacidad antioxidante medida por TEAC revela la capacidad de los tratamientos T2 y T3 para eliminar los radicales libres en las raíces. Esto puede atribuirse a la presencia de compuestos como los flavonoides y otros antioxidantes de bajo peso molecular, que actúan como agentes captadores de radicales y ayudan a reducir el estrés oxidativo en las células (Nile et al., 2017).

En raíces, los resultados del test FRAP indican que en el segundo año la capacidad antioxidante fue más baja en los tratamientos T2 y T3, mientras que según el test TEAC la mínima capacidad antioxidante se presentó en ambos años en el tratamiento T3 (Tabla 24).

Tabla 24. Actividad antioxidante FRAP y TEAC en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

FRAP		Raíz mg/g PF	Parte aérea mg/g PF
2020	T1	3,49	4,49
	T2	3,19	4,62
	T3	3,46	4,08
	Pvalor	NS	NS
2021	T1	3,24 a	5,21 a
	T2	2,70 b	5,25 a
	T3	2,30 b	4,68 b
	Pvalor	**	*
TEAC		Raíz	Parte aérea
1º año	T1	6,50 a	8,52
	T2	6,38 a	8,60
	T3	6,08 b	8,18
	Pvalor	*	NS
2º año	T1	5,01 ab	8,80
	T2	5,32 a	8,81
	T3	4,36 b	8,82
	Pvalor	*	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

En la parte aérea solo se observan variaciones en el test FRAP en el segundo año con los valores mínimos observados en el tratamiento T3 (Tabla 24).

Es interesante destacar que, aunque existe cierta correlación entre los resultados de FRAP y TEAC, también se observan discrepancias en los valores obtenidos. Esto indica que diferentes compuestos antioxidantes pueden contribuir de manera específica a cada técnica de medición. Por lo tanto, se puede inferir que las plantas de espárrago poseen una combinación diversa de antioxidantes, que trabajan en conjunto para proporcionar una protección antioxidante efectiva en respuesta al estrés oxidativo.

2.2.3.8. Resumen

En resumen, los resultados obtenidos de MDA, H_2O_2 , SOD, APX, Ascorbato, Glutathion y los test antioxidantes FRAP y TEAC indican que la presencia del SDE están asociadas con un mayor estrés oxidativo y una respuesta antioxidante alterada en las plantas de espárrago. Ya que fueron los tratamientos T2 y T3 con suelo con decaimiento los que presentaron más estrés oxidativo con valores en general superiores de MDA y H_2O_2 y reducción de los procesos de detoxificación con menores actividades enzimáticas (SOD y APX), menor concentración de antioxidantes como el AsA y menor capacidad antioxidante (test FRAP y TEAC). Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que tanto el SDE pueden desempeñar un papel importante en la generación de estrés oxidativo en las plantas de espárrago, afectando la homeostasis redox y la capacidad antioxidante.

En el tratamiento T1, donde el suelo está libre del síndrome del decaimiento, se observaron niveles más bajos de MDA y H_2O_2 , lo cual indica una menor acumulación de peroxidación lipídica y menor producción de ROS. Estos resultados sugieren que la ausencia del síndrome del decaimiento puede contribuir a un menor estrés oxidativo en las plantas de espárrago. Además, se encontraron niveles más altos de actividad de enzimas antioxidantes como SOD y APX en comparación con los tratamientos afectados por el síndrome del decaimiento (T2 y T3), lo cual indica una mayor capacidad de neutralización de especies reactivas de oxígeno y una respuesta antioxidante más activa en las plantas del tratamiento T1.

Por otro lado, en los tratamientos T2 y T3, donde el suelo está fuertemente afectado por el síndrome del decaimiento, se observaron niveles más altos de MDA y H_2O_2 , lo cual indica un mayor estrés oxidativo y daño oxidativo en las

plantas de espárrago. Estos resultados son consistentes con estudios anteriores que han demostrado que el síndrome del decaimiento puede desencadenar la producción de ROS y generar estrés oxidativo en las plantas (Jacobi et al., 2023; L C Noperi-Mosqueda et al., 2020). Además, se encontraron niveles más bajos de actividad de enzimas antioxidantes como SOD y APX en comparación con el tratamiento T1, lo cual sugiere una capacidad antioxidante reducida en respuesta al síndrome del decaimiento.

2.2.4. Metabolismo de fenoles

2.2.4.1. Fenoles totales

Los fenoles son un grupo diverso de compuestos químicos presentes en las plantas, que desempeñan una amplia variedad de funciones biológicas. Estos compuestos se sintetizan a través de la vía del ácido shikímico y se encuentran en diversas partes de las plantas, como raíces, tallos, parte aéreas, flores y frutos. Los fenoles cumplen funciones importantes en la defensa contra patógenos y herbívoros, así como en la regulación del crecimiento y desarrollo de las plantas. Una de las propiedades interesantes de los fenoles es su capacidad para influir en la comunicación entre las plantas y su entorno a través de un fenómeno conocido como alelopatía. La alelopatía se refiere a la capacidad de las plantas de liberar compuestos químicos al medio ambiente que pueden afectar el crecimiento y desarrollo de otras plantas vecinas o incluso a ellas mismas. En este sentido, los fenoles pueden acumularse en el suelo a través de la lixiviación de residuos vegetales o mediante la exudación de raíces, y pueden ejercer efectos tanto positivos como negativos sobre las especies vegetales. La acumulación de fenoles puede tener efectos alelopáticos, inhibiendo el crecimiento al interferir en la germinación de semillas, el desarrollo

radicular o la actividad enzimática. Algunos fenoles, como los ácidos fenólicos, taninos y flavonoides, se han asociado con efectos alelopáticos significativos. Estos compuestos pueden alterar la disponibilidad de nutrientes en el suelo, afectar la simbiosis planta-microorganismo, modificar la actividad enzimática o actuar directamente sobre el crecimiento de las plantas vecinas.

La tabla presenta los niveles de fenoles totales en las raíces y parte aéreas del espárrago para dos años consecutivos y tres tratamientos diferentes (T1, T2 y T3). En el primer año, se observa que el tratamiento T2 presenta el valor más alto de fenoles totales tanto en las raíces (4.03a) como en las parte aéreas (0.78), seguido de cerca por el tratamiento T3. Por otro lado, el tratamiento T1 muestra los valores más bajos en ambos tejidos. Estas diferencias son estadísticamente significativas en el caso de los fenoles totales en las raíces, mientras que no se encontraron diferencias significativas en la parte aérea (Tabla 25).

Tabla 25. Valores de concentración de fenoles totales en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Fenoles Totales		Raíz mg/g PF	Parte aérea mg/g PF
2020	T1	3,61 b	0,75
	T2	4,03 a	0,78
	T3	3,95 ab	0,78
	Pvalor	*	NS
2021	T1	2,81 a	0,81 b
	T2	2,76 a	0,90 a
	T3	2,35 b	0,81 b
	Pvalor	**	*

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

En el segundo año, los resultados muestran un cambio en los niveles de fenoles totales. En las raíces, el tratamiento T1 tiene el valor más alto, seguido

por el tratamiento T2, mientras que el tratamiento T3 muestra el valor más bajo. Por otro lado, en la parte aérea, el tratamiento T2 presenta el valor más alto, seguido por el tratamiento T1, y nuevamente el tratamiento T3 muestra el valor más bajo. Estas diferencias son estadísticamente significativas tanto en las raíces como en la parte aérea, lo que indica que los tratamientos influyen en los niveles de fenoles totales en ambas partes de la planta (Tabla 25).

En resumen, los resultados indican que los tratamientos tienen un impacto significativo en los niveles de fenoles totales en las raíces y parte aéreas del espárrago. En el primer año, el tratamiento T2 muestra los valores más altos de fenoles totales en ambos tejidos, mientras que, en el segundo año, los niveles varían entre los tratamientos, con T1 mostrando los valores más altos en las raíces y T2 mostrando los valores más altos en la parte aérea.

Vale la pena mencionar que los fenoles son compuestos vegetales con propiedades antioxidantes y pueden desempeñar un papel importante en la protección de las plantas contra el estrés abiótico y la respuesta a patógenos. Estudios anteriores han demostrado que los niveles de fenoles totales pueden aumentar en respuesta a estímulos estresantes como la presencia de patógenos, daño mecánico o condiciones ambientales adversas (Misra et al., 2023).

Los tratamientos del ensayo pueden tener implicaciones significativas en los resultados obtenidos en términos de los niveles de fenoles totales en las raíces y parte aéreas del espárrago:

- Tratamiento T1: Este tratamiento involucra el uso de suelo de una parcela donde nunca se ha cultivado espárrago. Los niveles de fenoles totales en

las raíces y parte aéreas del espárrago son relativamente bajos en comparación con los otros tratamientos. Esto sugiere que la ausencia de cultivo previo de espárrago en el suelo puede afectar la síntesis y acumulación de fenoles en las plantas. Es posible que la presencia de ciertos microorganismos pueda desempeñar un papel en la producción de fenoles en las plantas de espárrago. Los espárragos de este tratamiento al no estar sometidos a tanto estrés como los de los otros tratamientos, podría conllevar una menor producción de compuestos antioxidante defensivos como son los fenoles

- Tratamiento T2: En este tratamiento, el suelo fuertemente afectado por el síndrome del decaimiento del espárrago se desinfecta con Dazomet para eliminar los patógenos presentes. Se observa un aumento significativo en los niveles de fenoles totales en las raíces en comparación con el tratamiento T1. Esto podría deberse a la respuesta defensiva de las plantas de espárrago frente a la desinfección con Dazomet que podría haber afectado negativamente el desarrollo de las plantas debido a los cambios en la composición microbiana y la disponibilidad de nutrientes.
- Tratamiento T3: En este tratamiento, el suelo fuertemente afectado por el síndrome del decaimiento del espárrago no se desinfecta, lo que permite la presencia de patógenos. Esto indica que la presencia de patógenos y restos de garras del cultivo anterior puede influir en la síntesis y acumulación de fenoles en las plantas de espárrago. Los fenoles podrían desempeñar un papel en la respuesta defensiva de las plantas ante el estrés causado por el síndrome.

En general, los tratamientos del ensayo muestran que la presencia de patógenos, desinfección del suelo y restos de cultivos anteriores, pueden tener implicaciones significativas en los niveles de fenoles totales en las raíces y parte aéreas del espárrago. Estos resultados sugieren que el síndrome del decaimiento del espárrago está influenciado por factores abióticos, que a su vez pueden desencadenar respuestas bioquímicas en las plantas, como la acumulación de fenoles como mecanismo de defensa.

2.2.4.2. Polifenol oxidasa (PPO)

Se muestra la actividad de la enzima PPO en las raíces y parte aéreas del espárrago en respuesta a diferentes tratamientos durante el primer y segundo año del ensayo. Se observan diferencias significativas en la actividad de PPO entre los tratamientos en ambos años, lo que indica que los tratamientos pueden influir en la actividad de esta enzima en el espárrago (Tabla 26).

Tabla 26. Actividad PPO en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

PPO		Raíz $\Delta\text{Abs min}^{-1} \text{mg}^{-1} \text{prot}$	Parte aérea $\Delta\text{Abs min}^{-1} \text{mg}^{-1} \text{prot}$
2020	T1	0,128 b	0,320
	T2	0,124 b	0,299
	T3	0,153 a	0,327
	Pvalor	*	NS
2021	T1	0,117 b	0,175 b
	T2	0,113 b	0,215 a
	T3	0,131 a	0,189ab
	Pvalor	***	*

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$, y NS (no significativo), $P > 0,05$. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

La actividad de la enzima PPO está estrechamente relacionada con la oxidación de los polifenoles en las plantas y puede influir en diversos aspectos,

como el color y sabor de los productos vegetales, así como en las respuestas de defensa de las plantas contra patógenos y estrés ambiental (Yu et al., 2020).

En el primer año del ensayo, se observó una actividad de PPO significativamente más alta en las raíces del espárrago en el tratamiento T3 en comparación con los tratamientos T1 y T2 (Tabla 26). Estos resultados respaldan hallazgos previos que indican que la presencia de estrés biótico, como la infección por patógenos o la presencia de enfermedades, puede desencadenar respuestas de defensa en las plantas, incluida la inducción de la actividad de PPO (Szabo et al., 2022).

En el segundo año del ensayo, se observaron diferencias significativas en la actividad de PPO entre los tratamientos. El tratamiento T3 mostró la actividad más alta de PPO en las raíces, mientras que el tratamiento T2 presentó la actividad más alta en la parte aérea. Estos resultados podrían explicarse por la distribución diferencial de la actividad de PPO en diferentes partes de la planta y la respuesta de defensa inducida en cada tejido (-Beltagi & Zhang, 2023).

Además, la actividad de PPO puede ser influenciada por factores como el genotipo de la planta, la edad de la planta, las condiciones de crecimiento y el manejo agronómico. Por ejemplo, estudios han demostrado que diferentes variedades de espárrago pueden mostrar variaciones en la actividad de PPO (Jiménez-Sánchez et al., 2021). Asimismo, se ha observado que la aplicación de estrategias de manejo agronómico, como la desinfección del suelo, puede afectar la actividad de PPO en las plantas (Etesami et al., 2020).

Los resultados sugieren que la presencia de estrés biótico, como la infección por patógenos, puede inducir una mayor actividad de PPO. El

tratamiento que destacó en los resultados obtenidos fue el T3, que consistió en el suelo de una parcela fuertemente afectada por el síndrome del decaimiento del espárrago sin desinfectar. En varios parámetros analizados, como los fenoles totales y la actividad de la enzima PPO, el T3 mostró valores significativamente superiores en comparación con los otros tratamientos. Esto sugiere que la presencia de patógenos en el suelo puede desencadenar respuestas de defensa más intensas en la planta, lo cual es consistente con estudios previos que han relacionado la infección por patógenos con la acumulación de compuestos fenólicos y la activación de enzimas relacionadas con la defensa de la planta (Chtioui et al., 2022). Además, la mayor actividad PPO encontrada en la raíz de las plantas de espárrago del tratamiento T3, podría explicar los menores niveles de fenoles encontrados en la raíz de estas plantas (Tabla 26).

2.2.4.3. Perfil de fenoles

Los análisis de los compuestos de ácidos fenólicos y flavonoles en diferentes partes de la planta de espárrago (parte aérea y parte radicular) y en el suelo proporcionan información importante sobre la composición química y las posibles interacciones entre los tratamientos aplicados.

En el análisis de los ácidos fenólicos en la parte aérea del espárrago, se observa una variación en los niveles de los diferentes compuestos entre los tratamientos y los años evaluados (Tabla 27). En la parte aérea, no se encontraron diferencias para los compuestos fenólicos analizados excepto para el 4-CQA en el año 2020 donde el tratamiento T1 mostró mayores niveles de este compuesto fenólico.

En la parte radicular, se encontró que el tratamiento T1 en el segundo año presentó niveles significativamente más bajos de ácido cafeico hex en comparación con T2. Asimismo, el tratamiento T1 en el primer año mostró niveles más altos de ácido cafeico en comparación con T2. Estos resultados sugieren que los tratamientos pueden tener un impacto en la composición de los ácidos fenólicos en las raíces de las plantas de espárrago.

En cuanto al suelo, se observa que, en el segundo año, los tratamientos T2 y T3 mostraron niveles significativamente más altos de Feruloil-deriv. Además, el tratamiento T3 en el primer año presentó niveles más altos de Feruloil-deriv en comparación con T1 y T2. Estos hallazgos indican que los tratamientos pueden influir en la presencia de compuestos fenólicos en el suelo, lo cual puede afectar la disponibilidad de estos compuestos para las plantas. Es muy importante resaltar que investigaciones previas han evidenciado la capacidad potencialmente alelopática de los compuestos derivados del ácido ferúlico. (Wu et al., 2010). El hecho de que este compuesto fenólico esté presente en más concentración en los suelos afectados por el SDE puede indicarnos que este compuesto podría ser uno de posibles causantes del SDE.

Tabla 27. Valores de concentración de ácidos fenólicos en suelo, parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante el primer y segundo año de estudio (2020-2021).

Ácidos Fenólicos (mg/g PS)								
Suelo		3-CQA	4-CQA	Ácido cafeico hex	Ácido cafeico	Feruloil-QA	p-Cum.-deriv	Feruloil-deriv.
2020	T1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,003
	T2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,003
	T3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,006
	Pvalor	-	-	-	-	-	-	NS
2021	T1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,04 b
	T2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,08 a
	T3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,08 a
	Pvalor	-	-	-	-	-	-	**
Parte radicular		3-CQA	4-CQA	Ácido cafeico hex	Ácido cafeico	Feruloil-QA	p-Cum.-deriv	Feruloil-deriv.
2020	T1	ND	ND	0,41	4,30	ND	ND	ND
	T2	ND	ND	0,49	4,36	ND	ND	ND
	T3	ND	ND	0,50	4,35	ND	ND	ND
	Pvalor	-	-	NS	NS	-	-	-
2021	T1	ND	ND	0,23 b	3,62 a	ND	ND	ND
	T2	ND	ND	0,51 a	3,23 b	ND	ND	ND
	T3	ND	ND	0,39 ab	2,92 c	ND	ND	ND
	Pvalor	-	-	**	***	-	-	-
Parte aérea		3-CQA	4-CQA	Ácido cafeico hex	Ácido cafeico	Feruloil-QA	p-Cum.-deriv	Feruloil-deriv.
2020	T1	0,58	0,04 a	ND	ND	0,06	0,22	0,05
	T2	0,34	0 b	ND	ND	0,08	0,12	0,03
	T3	0,16	0 b	ND	ND	0,13	0,13	0,05
	Pvalor	NS	*	-	-	NS	NS	NS
2021	T1	0,36	0,15	ND	ND	ND	ND	0,47
	T2	0,47	0,15	ND	ND	ND	ND	0,51
	T3	0,45	0,19	ND	ND	ND	ND	0,28
	Pvalor	NS	NS	-	-	-	-	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. ND (no detectado). Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (T1), suelo con decaimiento desinfectado (T2), suelo con decaimiento sin desinfectar (T3).

En cuanto a los flavonoles, los resultados muestran que los tratamientos también pueden tener un efecto en su composición (Tabla 28). En la parte aérea del espárrago, se observaron diferencias en los niveles de los diferentes flavonoles entre los tratamientos y los años evaluados. En el primer año, el tratamiento T1 presentó los niveles más altos de Apigenin digluc (Vicenin2), Kaemp rut., Isorhamnetina rutinoside, y Q-rut-deriv., mientras que el T3 fue el

que tuvo los, mayores niveles de Q-Rut- hex. En el segundo año, los niveles de flavonoles fueron más bajos en general, pero el tratamiento T2 exhibió niveles más altos de Apigenin digluc (Vicenin2), Kaemp-Rut y Q-Rut-deriv. Estos resultados sugieren que los tratamientos pueden influir en la composición de los flavonoles en la parte aérea del espárrago.

Tabla 28. Valores de concentración de flavonoles en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante el primer y segundo año de estudio (2020-2021).

Flavonoles (mg/g PS)								
Parte radicular		Apigenina digluc (Vicenin2)	Q-Rut-hex	Q-Rutina	Kaemp Rut.	Q-rut-deriv.	Isorhamnetina Rut	Isorhamnetina hex
2020	T1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	T2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	T3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Pvalor	-	-	-	-	-	-	-
2021	T1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	T2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	T3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Pvalor	-	-	-	-	-	-	-
Parte aérea		Apigenina digluc (Vicenin2)	Q-Rut-hex	Q-Rutina	Kaemp Rut.	Q-rut-deriv.	Isorhamnetina Rut	Isorhamnetina hex
2020	T1	0,98	0 b	9,04 a	0,46 a	0,12	0,40 a	0,20 a
	T2	0,80	0 b	7,35 ab	0,31 b	0	0,24 b	0,09 ab
	T3	0,97	0,06 a	5,78 b	0,36 ab	0,06	0,35 ab	0,06 b
	Pvalor	NS	*	*	*	NS	*	*
2021	T1	0,62 ab	ND	4,59	0,19 ab	0 b	0,13	ND
	T2	0,77 a	ND	4,78	0,27 a	0,09 a	0,12	ND
	T3	0,53 b	ND	4,60	0,12 b	0,04 ab	0,11	ND
	Pvalor	*	-	NS	*	**	NS	-

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. ND (no detectado). Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

En la parte radicular del espárrago y en el suelo, la mayoría de flavonoles se encontraron en niveles por debajo de su límite de detección, lo que indica que estos compuestos pueden estar presentes en niveles más bajos en comparación con la parte aérea de la planta.

La acumulación de fenoles puede estar involucrada en el síndrome del decaimiento del espárrago, especialmente cuando se desinfecta el suelo y se elimina la presencia de patógenos, como en el tratamiento T2 (Romero-Fierro et al., 2021).

En condiciones normales, los fenoles desempeñan un papel importante en la protección de las plantas contra enfermedades, ya que tienen propiedades antimicrobianas y pueden inhibir el crecimiento de microorganismos patógenos.

Sin embargo, en ciertos casos, como en el síndrome del decaimiento del espárrago, la acumulación excesiva de fenoles puede tener efectos negativos en las plantas, como es el caso de la alelopatía (Misra et al., 2023).

Basándonos en los resultados anteriores y en la evolución de las plantas vivas (Figura 27), podemos realizar una discusión comparativa de los posibles efectos de los tratamientos y el diseño experimental en la mortalidad de las plantas de espárragos.

En el tratamiento T2, donde se desinfectó el suelo para eliminar patógenos, es posible que se haya interrumpido el equilibrio natural entre los fenoles y los microorganismos del suelo. Esto podría haber resultado en una disminución de la actividad microbiana benéfica, que normalmente ayuda a descomponer y reciclar los compuestos fenólicos en el suelo (Liu et al., 2020). Como resultado, la acumulación de fenoles podría haber sido mayor en el suelo del tratamiento T2, lo que podría haber causado daño o toxicidad en las raíces de las plantas de espárrago (alelopatía).

La mayor mortalidad observada en el tratamiento T2 podría ser el resultado de esta acumulación de fenoles en el suelo desinfectado. Los fenoles en concentraciones elevadas pueden tener efectos tóxicos sobre las plantas, inhibiendo su crecimiento y desarrollo, y aumentando su susceptibilidad a enfermedades y otros factores de estrés. Por lo tanto, la falta de microorganismos beneficiosos en el suelo del tratamiento T2, debido a la desinfección, pudo haber contribuido a la acumulación de fenoles y, a su vez, a la mayor mortalidad de las plantas.

2.2.5. Nutrientes

En este apartado, se analizan los niveles de nutrientes (P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, B) en el cultivo de espárrago en diferentes tratamientos de suelo (T1, T2, T3) relacionados con el Síndrome del decaimiento del espárrago (SDE). Se comparan la concentración de nutrientes en parte aéreas y raíces, buscando posibles diferencias entre tratamientos y su impacto en el desarrollo del SDE (Tabla X).

Tabla 29. Valores de concentración de nutrientes en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

2020		P	K	S	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
Raíz	T1	1,08 c	14,13 b	3,39	7,14 ab	2,81 a	984,73 b	61,61 a	19,66 c	13,63 a	4,17 b
	T2	1,53 a	19,61 a	3,36	8,05 a	2,68 ab	1405,52 a	56,68 a	25,86 a	12,37 b	5,01 ab
	T3	1,32 b	18,18 a	3,37	6,32 b	2,30 b	984,73 b	45,89 b	22,08 b	10,35c	5,29 a
	Pvalor	***	***	NS	*	*	*	*	***	***	*
Parte aérea	T1	1,51 b	19,26 b	3,43	7,21	2,45	120,31	66,98	18,91 b	8,54	28,88
	T2	1,76 a	21,54 a	3,40	5,88	2,15	127,21	55,83	24,23 a	8,48	21,48
	T3	1,65 ab	22,04 a	3,55	5,71	2,03	146,66	47,90	23,97 a	8,46	18,85
	Pvalor	*	*	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS
2021		P	K	S	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
Raíz	T1	1,15 b	9,07 b	3,30	5,51 ab	1,67 ab	2734,70	72,51 a	28,07	12,55 a	4,21 b
	T2	1,52 a	11,09 a	3,47	4,38 b	1,33 b	1833,93	54,00 b	28,35	10,05 b	3,90 b
	T3	1,28 ab	11,52 a	3,67	7,36 a	1,88 a	2751,70	75,18 a	31,28	10,22 b	5,69 a
	Pvalor	*	***	NS	*	*	NS	*	NS	*	**
Parte aérea	T1	1,66	13,05	3,78	4,00 b	1,27	117,70 b	52,63	24,28 b	7,47	23,67 b
	T2	1,67	14,10	3,70	4,73 ab	1,23	187,44 a	66,53	27,44 a	7,07	36,76 a
	T3	1,82	13,15	3,34	4,98 a	1,43	133,79 b	57,90	23,76 b	6,65	27,42 ab
	Pvalor	NS	NS	NS	*	NS	*	NS	**	NS	*

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P < 0,05, ** P < 0,01, *** P < 0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Macronutrientes (P, K, S, Ca y Mg (mg g⁻¹ PS)), micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu y B (µg g⁻¹ PS)). Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (T1), suelo con decaimiento desinfectado (T2), suelo con decaimiento sin desinfectar (T3).

En el año 2020, se observaron diferencias significativas en los niveles de nutrientes entre los tratamientos tanto en la parte aéreas como en las raíces. En la parte aérea, el tratamiento T2 mostró valores más altos de fósforo (P) en comparación con T1 y T3, lo cual sugiere una mayor disponibilidad de este nutriente en el suelo tratado con Dazomet. Además, se encontró una mayor concentración de calcio (Ca) y magnesio (Mg) en T1 en comparación con T2 y T3, lo cual podría indicar una mayor capacidad de retención de estos nutrientes en el suelo no tratado (Tabla 29).

En cuanto a los micronutrientes, los tratamientos T2 y T3 exhibieron valores más altos de hierro (Fe) y zinc (Zn) en la parte aéreas en comparación con T1, lo cual podría estar relacionado con la aplicación de Dazomet y sus efectos en la disponibilidad de estos nutrientes en el suelo (Tabla 29). Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en los niveles de manganeso (Mn) y cobre (Cu) entre los tratamientos, lo que indica que estos nutrientes podrían estar presentes en cantidades similares en los suelos estudiados.

En las raíces, el tratamiento T2 mostró valores más altos de fósforo (P), potasio (K) y calcio (Ca) en comparación con T1 y T3. Esto sugiere una mayor absorción y acumulación de estos nutrientes en las raíces de las plantas cultivadas en el suelo tratado con Dazomet (Tabla 29). Además, se encontró una mayor concentración de hierro (Fe) y zinc (Zn) en T2 en comparación con T1 y T3, lo cual puede estar relacionado con la disponibilidad de estos micronutrientes en el suelo tratado. En el caso del cobre (Cu), el tratamiento T1 mostró los mayores niveles, lo que podría indicar una mayor acumulación de este nutriente en las raíces en ausencia de tratamiento con Dazomet. Por otro lado, el

tratamiento T3 presentó niveles más altos de boro (B) en comparación con T1 y T2, lo cual puede ser resultado de las condiciones específicas del suelo y su relación con el desarrollo del SDE (Tabla 29).

En el año 2021, las diferencias en los niveles de nutrientes entre los tratamientos fueron menos pronunciadas en comparación con el año 2020. Sin embargo, se observó que el tratamiento T2 mostró valores más altos de hierro (Fe), boro (B) y zinc (Zn) en la parte aérea en comparación con T1 y T3, lo cual indica una posible influencia persistente del tratamiento con Dazomet en la disponibilidad de estos nutrientes (Tabla 29). En las raíces, el tratamiento T2 exhibió valores más altos de fósforo (P) en comparación con T1 y T3, lo que sugiere una mayor absorción y acumulación de este nutriente en el suelo tratado. Además, el tratamiento T3 mostró niveles más altos de calcio (Ca), magnesio (Mg) y boro (B) en comparación con T1 y T2, lo cual puede ser atribuido a las características específicas del suelo no tratado. El tratamiento T1 fue el que mostró los mayores niveles de cobre (Cu) en las raíces (Tabla 29).

En resumen, los resultados obtenidos en este estudio muestran que los tratamientos de suelo relacionados con el Síndrome del decaimiento del espárrago (SDE) tienen un impacto significativo en los niveles de nutrientes en parte aérea y raíces de las plantas de espárrago. El tratamiento con Dazomet (T2) parece influir positivamente en la disponibilidad de fósforo, hierro y zinc, tanto en la parte aérea como en las raíces, mientras que el suelo no tratado (T1) muestra una mayor concentración de calcio, magnesio y cobre en algunos casos.

2.3. Cosecha y calidad

2.3.1. Cosecha

Los resultados obtenidos en el rendimiento comercial del espárrago en los diferentes tratamientos (T1, T2 y T3) presentaron diferencias significativas entre sí durante los años de estudio (2019, 2020 y 2021) (tabla 30). Estos hallazgos son concordantes con investigaciones anteriores que han demostrado la influencia del síndrome del decaimiento del espárrago en la productividad de los cultivos.

En el año 2019, se observó que T1 obtuvo el mayor rendimiento con un promedio de 2816,18 kg/ha, seguido de T3 con un promedio de 1795,19 kg/ha, mientras que T2 mostró el rendimiento más bajo con un promedio de 1502,04 kg/ha. Estas diferencias fueron estadísticamente significativas (Tabla 30).

En el año 2020, se observó una tendencia similar, donde T1 nuevamente presentó el rendimiento más alto con un promedio de 4199,64 kg/ha, seguido de T3 con un promedio de 2685,54 kg/ha. Sin embargo, T2 mostró el rendimiento más bajo con un promedio de 1325,99 kg/ha, siendo significativamente inferior a los otros tratamientos (Tabla 30).

En el año 2021, los resultados mostraron una vez más que T1 y T3 obtuvieron rendimientos superiores, con promedios de 4297,20 kg/ha y 3309,69 kg/ha respectivamente. En este caso, T2 se mantuvo por debajo de los otros tratamientos, con un promedio de 889,75 kg/ha (Tabla 30).

Tabla 30. Valores acumulados (kg/ha) de rendimiento comercial y no comercial al final del periodo de cosecha de los años 2019, 2020 y 2021.

Rendimiento Comercial (Kg/ha)	T1	T2	T3	p-valor
2019	2816,18 a	1502,04 b	1795,19 b	**
2020	4199,64 a	1325,99 c	2685,54 b	***
2021	4297,20 a	889,75 b	3309,69 a	*
Rendimiento No Comercial (Kg/ha)	T1	T2	T3	p-valor
2019	71,18 a	48,86 b	49,35 b	*
2020	1690,60 a	587,05 b	1387,33 a	**
2021	340,70 a	57,68 c	192,52 b	***

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

Para los tres años de estudio, el tratamiento T1, que consiste en un suelo libre de síndrome del decaimiento y sin historial de cultivo de espárrago, tuvo el rendimiento comercial más alto. Estos resultados concuerdan con los estudios de (Djalali Farahani-Kofoet et al., 2023), quienes encontraron que los suelos sin síndrome del decaimiento del espárrago favorecen un mayor rendimiento y una mejor calidad del cultivo.

Las discrepancias en los rendimientos entre los tratamientos T2 y T3, por otra parte, podrían estar relacionadas con la presencia o ausencia de microbiota antagonista en el suelo. La desinfección del suelo en T2 pudo haber eliminado o reducido significativamente los microorganismos beneficiosos que actúan como agentes de control biológico de los patógenos responsables del síndrome del decaimiento del espárrago. Esto pudo haber creado un desequilibrio en la comunidad microbiana, lo que resultó en un menor rendimiento y un mayor

impacto del síndrome en las plantas de espárrago. Además, existen estudios que apuntan a algunos microorganismos del suelo como agentes capaces de eliminar o detoxificar las sustancias autotóxicas generadas por las plantas de espárrago del cultivo anterior (Li et al., 2017; Mishra et al., 2013). La desinfección con solarización aplicada en T2 pudo eliminar también estos organismos contribuyendo a la disminución del rendimiento de este tratamiento.

Por otro lado, tanto T1 como T3, que no fueron desinfectados, podrían haber mantenido un microbiota del suelo más diversa y equilibrada, lo que permitió una mayor resistencia de las plantas al síndrome y, en consecuencia, un rendimiento comercial superior. Estos hallazgos coinciden con los estudios de (De la Lastra et al., 2021), quienes señalaron que la presencia de microorganismos benéficos en el suelo puede mejorar la resistencia de las plantas al síndrome del decaimiento del espárrago.

Por otra parte, cabe reseñar, la tendencia a igualarse la producción comercial entre los tratamientos T1 y T3 en el tercer ciclo (figura 29). La posibilidad de contaminación del suelo durante las labores agrícolas es una hipótesis válida que podría explicar esta similitud en los rendimientos finales. Las labores agrícolas, como preparación del suelo, pueden contribuir a la dispersión de patógenos o microorganismos dañinos en el suelo. Si estos patógenos están presentes al final de los tres ciclos en el T1 (suelo sin síndrome del decaimiento), podrían haber sido introducidos accidentalmente durante las labores agrícolas y haber afectado a la producción comercial de espárrago.

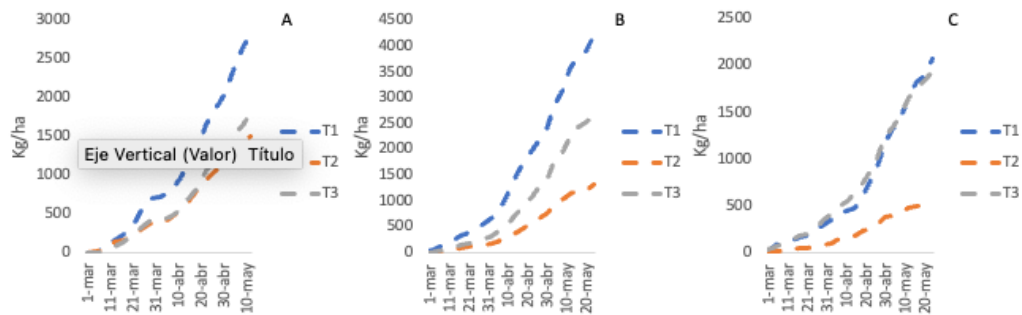


Figura 29. Evolución del rendimiento comercial (Kg/ha) de tratamientos T1, T2 y T3 a lo largo del tiempo de cosecha durante 3 años de ensayo (2019, 2020 y 2021). A) Rendimiento comercial en 2019 B) Rendimiento comercial en 2020 C) Rendimiento comercial en 2021.

En resumen, los resultados sugieren que la desinfección del suelo puede tener consecuencias negativas en el rendimiento del espárrago y el control del síndrome del decaimiento. Preservar una microbiota equilibrada y diversa en el suelo puede ser una estrategia importante para minimizar los problemas no comerciales y mejorar el rendimiento en este cultivo.

Para el rendimiento no comercial del espárrago, se evidencia que T1 también presentó los valores más altos en todos los años, seguido por T3 y T2. Estas diferencias fueron altamente significativas, indicando que T1 y T3 tuvieron una mayor incidencia de espárragos no comerciales en comparación con T2 (tabla 30).

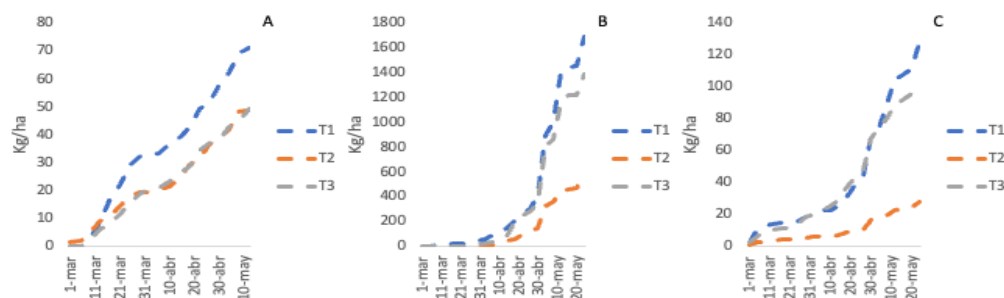


Figura 30. Evolución del rendimiento no comercial (Kg/ha) de tratamientos T1, T2 y T3 a lo largo del tiempo de cosecha durante 3 años de ensayo (2019, 2020 y 2021). A) Rendimiento No comercial en 2019 B) Rendimiento No comercial en 2020 C) Rendimiento No comercial en 2021.

Con respecto a la relación entre el rendimiento no comercial y el rendimiento comercial, en el año 2019, el rendimiento no comercial representó aproximadamente el 2.52%, 3.25% y 2.75% respectivamente, para los tratamientos T1, T2 y T3. En 2020, se produjo una reducción muy importante en la proporción de turiones no comerciales, representando aproximadamente el 40.24%, 44.22% y 51.69% para T1, T2 y T3, respectivamente. En 2021, el rendimiento no comercial representó aproximadamente el 7.93%, 6.48% y 5.82% para T1, T2 y T3, respectivamente. Consultar las figuras 27 y 28 para una representación gráfica de la evolución del rendimiento comercial y no comercial durante el período de tres años de ensayo (2019, 2020 y 2021).

La Figura 30 ilustra la evolución del rendimiento no comercial (kg/ha) para los tratamientos T1, T2 y T3 a lo largo del período de tres años de cosecha. En 2020, se produjo una reducción significativa en la proporción de turiones no comerciales, representando aproximadamente el 1.53%, 1.29% y 2.23% para T1, T2 y T3, respectivamente, del rendimiento comercial total (Tabla X). Al analizar los porcentajes, podemos observar que los valores en 2019 y 2021 son

bajos en general, lo que indica que los turiones no comerciales representan una cantidad relativamente baja en comparación con la cantidad total de turiones comerciales.

En el año 2020, sin embargo, destaca un aumento muy significativo en los porcentajes de rendimiento no comercial en todos los tratamientos, coincidiendo con el periodo de aislamiento por el Covid, lo que conllevó además de una mayor incidencia de plagas y enfermedades y, en general un peor seguimiento del cultivo, unas recolecciones más espaciadas que se tradujeron en un mayor número de espárragos dañados o fuera del rango comercial. En cuanto a la comparación entre los tratamientos, podemos observar que T1 mostró los porcentajes más bajos en los dos primeros ciclos, lo que indica una mejor capacidad de producción de espárragos con estándares comerciales. El último año, sin embargo, el porcentaje de turiones no comerciales aumentó mucho en T1, probablemente por el inicio de la contaminación cruzada que ya hemos mencionado con las labores agrícolas.

2.3.2. Calidad

En la (Tabla 31) de calidad del espárrago, se evaluaron varios parámetros, incluyendo peso, diámetro, dureza, volumen unitario, densidad de los turiones, contenido de azúcares (°Brix) y jugosidad. A continuación, se discutirán los resultados promedio de cada parámetro para los tratamientos T1, T2 y T3, así como las comparaciones entre los diferentes años de estudio.

Tabla 31. Parámetros de calidad medidos en los turiones cosechados de las plantas sometidas a los distintos tratamientos del estudio durante los años 2019, 2020 y 2021.

IFAPA		Peso (g)	Diámetro Intermedio (mm)	Dureza (g/cm ²)	Volumen unitario (dm ³)	Densidad turión (g/dm ³)	°Brix	Jugosidad %
2019	T1	20,48	9,78	521,28 b	53,57	0,382	5,84 b	-
	T2	20,57	9,98	527,65 b	49,65	0,392	6,14 b	-
	T3	22,21	9,38	549,97 a	48,79	0,396	6,70 a	-
	Pvalor	NS	NS	*	NS	NS	*	-
2020	T1	22,50	11,99	443,80	68,79	0,326	4,43 b	13,91 a
	T2	20,57	10,71	444,89	60,36	0,342	4,65 b	10,95 b
	T3	22,21	11,26	402,03	66,50	0,334	5,16 a	11,46 ab
	Pvalor	NS	NS	NS	NS	NS	*	*
2021	T1	17,40 a	9,42 a	460,92 a	48,87 a	0,356 b	5,00 b	13,90 a
	T2	13,06 b	8,04 b	438,93 ab	35,87 b	0,364 a	5,15 b	14,15 a
	T3	17, a	9,41 a	417,96 b	48,24 a	0,364 a	5,46 a	12,49 b
	Pvalor	*	*	*	*	**	*	*

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P < 0,05, ** P < 0,01, *** P < 0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: suelo sin cultivo de espárrago en un largo periodo anterior (**T1**), suelo con decaimiento desinfectado (**T2**), suelo con decaimiento sin desinfectar (**T3**).

En el año 2019, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos T1, T2 y T3 en cuanto a la dureza y el contenido de azúcares (°Brix) en los turiones de espárrago. El tratamiento T3 exhibió una mayor dureza en comparación con T1 y T2, lo que sugiere una textura más firme en los turiones. Además, se encontró un contenido de azúcares significativamente mayor en el tratamiento T3 en comparación con T1 y T2, indicando un mayor nivel de dulzura en los espárragos tratados con T3 (Tabla 31).

En el año 2020, no se encontraron diferencias significativas en la mayoría de los parámetros evaluados entre los tratamientos T1, T2 y T3, lo que indica una similitud en el peso, diámetro, dureza, volumen unitario y densidad de los turiones entre los tratamientos. Sin embargo, se observó que el tratamiento T3 presentó un contenido de azúcares significativamente mayor en comparación con los demás tratamientos, lo cual sugiere un efecto positivo en la dulzura de los espárragos tratados. Por otro lado, el tratamiento T1 mostró niveles más altos de jugosidad, lo que puede ser una característica favorable en términos de calidad sensorial (Tabla 31).

En el año 2021, se encontraron diferencias significativas en todos los parámetros estudiados entre los tratamientos T1, T2 y T3. El tratamiento T2 mostró un peso y un diámetro significativamente menor en comparación con T1 y T3, lo que indica un efecto negativo en el tamaño de los espárragos. Además, el tratamiento T1 exhibió una mayor dureza en comparación con los demás tratamientos, lo cual puede ser beneficioso en términos de textura firme. Por otro lado, el tratamiento T3 mostró un contenido de azúcares (°Brix) significativamente mayor, lo que indica una mayor dulzura en los espárragos tratados. Sin embargo, es importante destacar que el tratamiento T1 mostró una

densidad menor en comparación con T2 y T3, lo cual puede influir en la calidad general del espárrago (Tabla 31).

En conclusión, los resultados indican que los tratamientos T1, T2 y T3 tuvieron efectos diferenciados en los parámetros de calidad del espárrago. El tratamiento T3 mostró mejoras en la dureza y el contenido de azúcares, mientras que el tratamiento T1 se asoció con una mayor jugosidad y el tratamiento T2 tuvo un impacto negativo en el tamaño de los turiones. Estos hallazgos proporcionan información relevante para la optimización de los tratamientos en la producción de espárragos de alta calidad.

3. Determinación de la eficacia de diferentes estrategias de control

3.1. Parámetros de crecimiento

3.1.1. Análisis no destructivos

Con el fin de controlar los factores bióticos implicados en el síndrome de decaimiento en las plantaciones de espárragos, se evaluaron los efectos de dos métodos de desinfección del suelo: la desinfección química con solarización y el aporte de enmiendas orgánicas, también combinado con la solarización del suelo (biosolarización). En concreto se aplicó biosolarización con pellet de brassicas (T2), biosolarización con pellet de gallinaza (T3) y desinfección química con Basamid (T4), además de un tratamiento control sin ninguna aplicación (T1).

El objetivo era determinar la eficacia de estos tratamientos, para lo que se monitorizaron varios parámetros de crecimiento de plantas de espárrago a lo largo de los tres ciclos de cultivo posteriores a su aplicación: altura, fitovolumen, número de tallos e índice de área foliar (LAI). Los valores medios alcanzados al final de cada ciclo aparecen en la Tabla 32.

Tabla 32. Análisis no destructivos de parámetros de crecimiento de plantas de espárrago sometidas a distintos tratamientos, analizados durante los tres años del estudio (2018, 2019 y 2020).

		Altura (cm)	Fitovolumen (cm ³)	Nº de tallos	LAI (m ² m ⁻²)
2018	T1	88 ab	49	11	-
	T2	77 b	46	11	-
	T3	83 ab	46	12	-
	T4	92 a	50	11	-
	*		NS	NS	
2019	T1	96 b	202 b	13	0,6
	T2	103 b	280 ab	16	0,6
	T3	110, ab	260 b	14	0,7
	T4	121 a	391 a	12	0,8
	*		*	NS	NS
2020	T1	104	399	5 b	0,3 c
	T2	122	525	9 a	0,5 a
	T3	122	471	8 a	0,4 b
	T4	128	517	7 ab	0,4 ab
	NS		NS	*	***

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (**T1**), biosolarización con pellet de brassicas (**T2**), biosolarización con pellet de gallinaza (**T3**) y desinfección química con Basamid (**T4**).

En el primer año de estudio (2018), sólo se observaron diferencias significativas en la altura de las plantas. El tratamiento T4, la desinfección química con Dazomet, mostró los valores más altos (altura media 92,7 cm), lo que indica un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo de las plantas. La desinfección con gallinaza (T3) presentó un valor medio (77,9 cm) significativamente menor que los otros dos tratamientos, T1 y T2 con valores de 88,8 y 83 cm, respectivamente (. En el segundo año (2019), se manifestaron las mismas diferencias entre tratamientos que en el ciclo anterior para el parámetro altura. En el fitovolumen, sin embargo, el tratamiento T4 presentó un valor medio

superior al resto ($391,9 \text{ cm}^3$), mientras que T2 (biosolarización con brassica) con $280,0 \text{ cm}^3$ de media también se diferenció significativamente del control (T1) y de la biosolarización con gallinaza (T3) que alcanzaron valores medios inferiores ($202,5 \text{ cm}^3$ y $260,8 \text{ cm}^3$, respectivamente) (Tabla 32). Para los parámetros número de tallos y LAI tampoco hubo diferencias significativas en este segundo ciclo entre los tratamientos estudiados.

En el tercer año (2020), no hubo diferencias significativas para los parámetros altura y fitovolumen. Para el número de tallos todos los tratamientos de desinfección tuvieron un efecto positivo frente al tratamiento control T1. Finalmente, el mayor valor alcanzado para el índice de área foliar (LAI) se dio en los tratamientos T2 (brassicas) y T4 (Dazomet), con $0,55$ y $0,46 \text{ cm}^2/\text{cm}^2$, respectivamente, seguidos de T3 (gallinaza) con $0,43 \text{ cm}^2/\text{cm}^2$, significativamente mayor que el tratamiento control T1 con sólo $0,27 \text{ cm}^2/\text{cm}^2$ (Tabla 32). Los resultados obtenidos demuestran el efecto positivo de los tratamientos de desinfección química y biosolarización aplicados sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas de espárrago durante el periodo vegetativo, lo cual será fundamental para la optimización de la producción en los periodos siguientes de cosecha de turiones

A continuación, se presentan las figuras de evolución de los valores medios de cada parámetro, que proporcionan una visión de la evolución de los mismos para cada tratamiento a lo largo de los tres ciclos de cultivo (Figuras 31, 32 33 y 34). La plantación el primer año se retrasó hasta el mes de julio, por lo que también se retrasó mucho la toma de datos de crecimiento.

En cuanto a la altura de las plantas (Figura 31), se observó un incremento (con o sin significación) de todas las parcelas con aplicación de tratamientos

respecto al control a partir del segundo año tras la aplicación, desde el principio hasta el final de cada ciclo, siendo el tratamiento T4 el de mayor altura media.

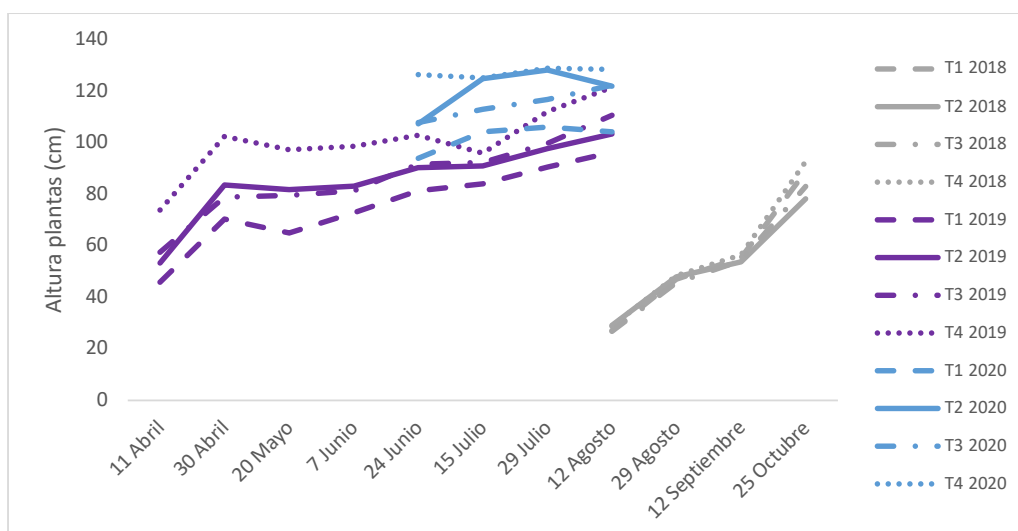


Figura 31. Evolución de la altura de plantas sometidas a los tratamientos de este estudio durante los años 2018, 2019 y 2020.

En relación al fitovolumen (Figura 32), las diferencias se aprecian en el último ciclo 2020 donde los tratamientos T2 y T4 mostraron un valor mayor en comparación con T1 y T3, lo que sugiere un mayor desarrollo de la biomasa vegetal en estos tratamientos.

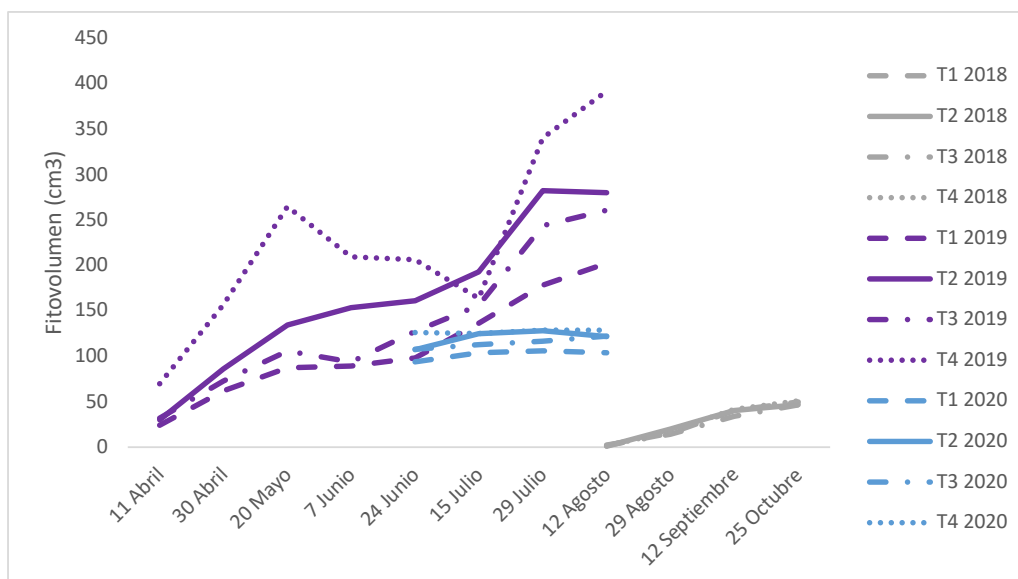


Figura 32. Evolución del fitovolumen de plantas sometidas a los tratamientos de este estudio durante los años 2018, 2019 y 2020.

En cuanto al número de tallos, los tratamientos T2 y T3 presentaron un incremento significativo a lo largo de los tres años, En el caso de T4 se desarrollan menos tallos, pero alcanzan una altura mayor y un volumen mayor del dosel vegetal (Figura 33).

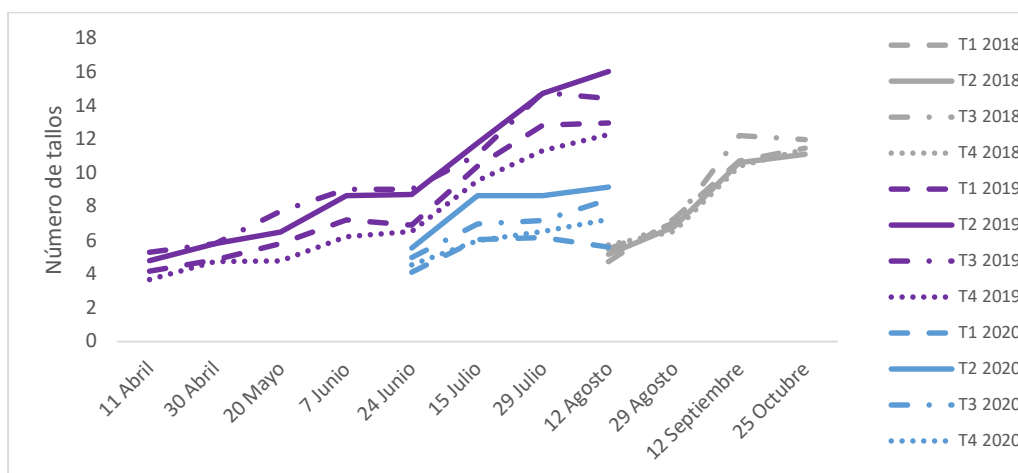


Figura 33. Evolución del número de tallos formados por las plantas sometidas a los tratamientos de este estudio durante los años 2018, 2019 y 2020.

En relación al Índice de Área Foliar (LAI), no hay una evolución creciente a lo largo del ciclo tan clara como en el resto de parámetros, con un período de

abril a junio en 2019 en que prácticamente no se incrementa la superficie foliar, para aumentar de nuevo la pendiente de la curva a partir de junio y hasta el final del ciclo. En 2020 incluso se produce una pérdida de dosel vegetal en esas fechas (Figura 34). La toma de datos se detuvo por las restricciones impuestas a la movilidad por el Covid.

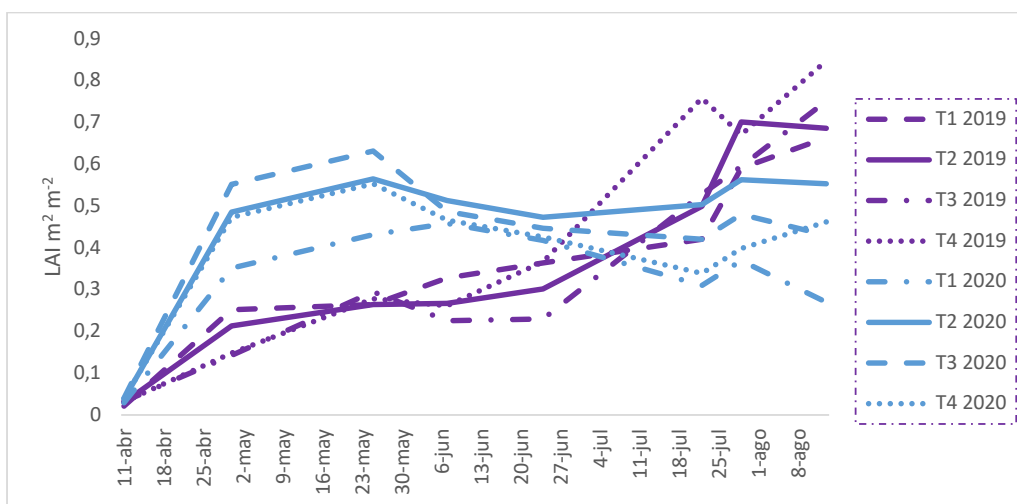


Figura 34. Evolución del LAI de plantas sometidas a los tratamientos de este estudio durante los años 2018, 2019 y 2020.

En resumen, los tratamientos T2 y T4 destacaron como las estrategias más efectivas para promover el crecimiento y desarrollo de las plantas de espárrago durante su período vegetativo en términos de altura, fitovolumen, número de tallos y LAI.

Estos resultados sugieren que tanto la desinfección química como la biofumigación con pellets de semillas de *B. carinata* pueden ser eficaces en el control de los factores bióticos implicados en el síndrome de decaimiento en las plantaciones de espárrago. Estos hallazgos están respaldados por investigaciones previas que han demostrado los beneficios de estos métodos de

control en la reducción de patógenos del suelo y la promoción del crecimiento vegetativo en los cultivos de hortalizas (dos Santos et al., 2021; Hanschen & Winkelmann, 2020; Panth et al., 2020).

Es importante remarcar que, dado el carácter plurianual del cultivo, hubiera sido muy interesante comprobar la evolución en años posteriores para conocer el alcance en el tiempo de los efectos de los tratamientos aplicados.

3.1.2. Análisis destructivos

La (tabla 33) presenta los valores medios de los parámetros evaluados en las raíces de las plantas de espárrago, incluyendo el peso total de las raíces, el porcentaje de raíces según su longitud y el contenido de materia seca para los cuatro tratamientos ensayados en dos años consecutivos (2019 y 2020).

Tabla 33. Parámetros de crecimiento destructivos de parte radicular de plantas de espárrago sometidas a distintos tratamientos, analizados dos años de estudio (2019-2020).

Raíces		Peso total (g)	% Raíces <10cm	% Raíces 10-15cm	% Raíces >15cm	Materia Seca (%)
2019	T1	331	65	14	21	26,5
	T2	273	62	20	15	23,2
	T3	204	68	16	16	24,0
	T4	203	62	21	16	24,7
	Pvalor	NS	NS	NS	NS	NS
2020	T1	638	57	20	22	34
	T2	863	58	19	19	33
	T3	555	58	19	20	34
	T4	572	54	20	26	38
	Pvalor	NS	NS	NS	NS	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (T1), biosolarización con pellet de brassicas (T2), biosolarización con pellet de gallinaza (T3) y desinfección química con Basamid (T4).

En el año 2019, aunque sin diferencias significativas se observa que el tratamiento T1 muestra el mayor peso total medio de raíces (331 g), seguido por el tratamiento T2 (273). Los tratamientos T3 y T4 presentan pesos totales medios

de raíces más bajos (204 y 203 g, respectivamente). En 2020, aunque también sin diferencias significativas, el tratamiento T2 con 863 g alcanzó el mayor peso medio de raíces (Tabla 33). En cuanto a la longitud de las raíces, tampoco existen diferencias significativas entre tratamientos, si bien en 2019 el tratamiento T1 mostró la mayor proporción de raíces de más de 15 cm respecto al total de raíces de la planta (21%) y el T3 la mayor proporción de raíces de menos de 10 cm respecto al total de raíces de la planta (68%) (Tabla 33). En 2020 los porcentajes de raíces de las distintas longitudes fueron muy similares para los tratamientos T1, T2 y T3, mientras que T4 presentó más raíces de mayor longitud (26%) y menos raíces cortas (54%) que el resto de tratamientos. La relación entre el peso total y el número de raíces totales muestra valores de peso unitario de raíz mayores para T1 y T2 en 2019 con 1,91 g y 1,61 g por raíz frente a los 1,40 g y 1,37 g que presentan T4 y T3, respectivamente. En 2020, sin embargo, el mayor peso unitario por raíz lo alcanza T4 con 2,82 g, frente a los 2,46 g de T1, 2,47 g de T2 y 2,52 g de T3 (Tabla 33). Por tanto, el sistema radicular del tratamiento con Dazomet está menos fasciculado, presentando raíces más largas y gruesas que el resto de tratamientos (Huang et al., 2023).

En términos de materia seca, los tratamientos no presentan diferencias significativas en el año 2019. Sin embargo, se puede observar que el tratamiento T1 tiene un valor de materia seca medio (26,5%) ligeramente más alto que los otros tres (entre 23,2 y 24,7%) (Tabla 33).

En el año 2020, sin embargo, se puede observar que el tratamiento T4 muestra el mayor contenido de materia seca (38%), mientras que los tratamientos T1, T2 y T3 tienen valores ligeramente más bajos (entre 33% y 34%) (Tabla 33).

La Tabla 34 presenta los valores medios de la producción de materia vegetal durante el periodo vegetativo. Por la fisiología de la planta de espárrago que no presenta parte aéreas como tales, se han tomado sólo los parámetros: peso total de parte aérea de planta, número de tallos y contenido de materia seca, para los cuatro tratamientos ensayados en dos años consecutivos (2019 y 2020).

Tabla 34. Parámetros de crecimiento destructivos de parte aérea de plantas de espárrago sometidas a distintos tratamientos, analizados durante dos años de estudio (2019-2020).

Tallos		Peso Total (g)	N.º Tallos	Materia Seca (%)
2019	T1	234	9	27
	T2	180	11	24
	T3	139	10	25
	T4	176	9	22
	Pvalor	NS	NS	NS
2020	T1	334	7	27
	T2	484	7	26
	T3	397	7	26
	T4	424	5	25
	Pvalor	NS	NS	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (**T1**), biosolarización con pellet de brassicas (**T2**), biosolarización con pellet de gallinaza (**T3**) y desinfección química con Basamid (**T4**).

En el año 2019 aunque sin diferencias significativas entre tratamientos, el tratamiento control T1 muestra el mayor peso total medio (234 g) y el mayor contenido medio en materia seca (27%) (Tabla 34).

En el año 2020, tampoco existen diferencias significativas entre los tratamientos para ninguno de los parámetros evaluados, si bien el tratamiento T2 muestra el mayor peso total medio de tallos (484 g), seguido por el tratamiento T4 (424 g). El tratamiento T1 (334 g) presenta el menor peso medio total de tallos, pero la diferencia no es estadísticamente significativa (Tabla 34).

En general, los resultados indican que no hay diferencias significativas en el peso de la parte aérea de la planta, el número de tallos y el contenido de materia seca entre los diferentes tratamientos en ambos años. Esto demuestra que los tratamientos evaluados no tienen un efecto pronunciado en estos parámetros de crecimiento de la planta de espárrago.

En resumen, los resultados indican que no hay diferencias significativas en el peso total de las raíces, la longitud de las mismas y su contenido de materia seca, entre los diferentes tratamientos en los dos ciclos de cultivo analizados. Esto demuestra que los tratamientos evaluados no tienen un efecto pronunciado en estos parámetros de las raíces de las plantas de espárrago, en los tres primeros años desde su aplicación.

3.2. Caracterización fisiológica

3.2.1 Pigmentos

En este apartado, se analizan los efectos de diferentes tratamientos en la acumulación de pigmentos en las plantas de espárrago. Los pigmentos, como las clorofilas y los carotenoides, desempeñan un papel fundamental en la fotosíntesis y la respuesta fisiológica de las plantas. El objetivo es evaluar cómo diferentes estrategias de control, como la biofumigación con pellets de semillas de *B. carinata* y la desinfección química con Dazomet, pueden influir en la acumulación de pigmentos y, por lo tanto, en el rendimiento y la salud de las plantas de espárrago (Tabla 35).

Tabla 35. Concentración de clorofilas, ratio clorofila a/b y concentración de carotenoides en plantas de espárrago, sometidas a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Pigmentos		Chls Totales mg/g PF	Chl a/b	Carotenoides mg/g PF
1º año	T1	0,34 b	2,13 b	0,108 b
	T2	0,38 a	2,86 b	0,123 a
	T3	0,32 b	1,64 b	0,095 c
	T4	0,32 b	5,49 a	0,115 ab
	Pvalor	*	***	***
2º año	T1	0,20 c	1,50 b	0,059 c
	T2	0,33 a	2,15 a	0,104 a
	T3	0,25 b	2,13 a	0,081 b
	T4	0,28 b	2,15 a	0,093 b
	Pvalor	***	***	***

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (**T1**), biosolarización con pellet de brassicas (**T2**), biosolarización con pellet de gallinaza (**T3**) y desinfección química con Basamid (**T4**).

En el primer año, el tratamiento T2 mostró diferencias significativas en comparación con los demás tratamientos en términos de pigmentos totales, y carotenoides. En cuanto a la relación Chla/b fue el tratamiento T4 el que obtuvo mayores valores. El tratamiento T2, que consistió en la biofumigación con pellets de semillas de *B. carinata*, exhibió los valores más altos en todos los pigmentos medidos (Tabla 35). Esto sugiere que la incorporación de *B. carinata* en el suelo puede promover una mayor síntesis y acumulación de pigmentos en las plantas de espárrago. *B. carinata* es conocida por su contenido en compuestos bioactivos, como glucosinolatos y otros metabolitos secundarios, que podrían influir en el metabolismo de los pigmentos y mejorar la respuesta fotosintética de las plantas.

Por otro lado, el tratamiento T4, que consistió en la desinfección química con Dazomet, también mostró valores altos en la relación clorofila a/b. Esto podría indicar que el Dazomet, aunque es un compuesto químico, pudo tener un

efecto estimulante en la acumulación de clorofila a en relación a la clorofila b. Sin embargo, es importante destacar que el tratamiento T4 no mostró un impacto tan significativo en los carotenoides en comparación con el tratamiento T2 (Tabla 35).

En el segundo año, los resultados refuerzan los hallazgos del primer año. El tratamiento T2 nuevamente mostró los valores más altos en los pigmentos totales y carotenoides. Todos los tratamientos de desinfección aumentaron los valores de ratio Chla/b (Tabla 34). Estos resultados respaldan la consistencia y la eficacia de la biofumigación con pellets de semillas de *B. carinata* en la promoción de la acumulación de pigmentos en las plantas de espárrago.

En contraste, los tratamientos T1 y T3 presentaron valores más bajos en los pigmentos en ambos años (Tabla 35). Estos resultados podrían sugerir que la falta de tratamiento o el uso de enmiendas orgánicas diferentes a las de *B. carinata* podrían tener un impacto limitado en la acumulación de pigmentos en las plantas de espárrago.

Es posible que algunos tratamientos hayan sido más efectivos en contrarrestar los efectos negativos del SDE en el suelo, lo que a su vez podría haber mejorado la acumulación de pigmentos en las plantas de espárrago. Por ejemplo, la biofumigación con pellets de semillas de *B. carinata* ha demostrado tener propiedades nematocidas y capacidad para controlar patógenos del suelo (Castillo-Díaz et al., 2022; Eugui et al., 2022). Estos efectos podrían haber contribuido a mejorar las condiciones del suelo y, por ende, la respuesta de las plantas en términos de acumulación de pigmentos.

Por otro lado, el tratamiento T4, que consistió en la desinfección química con Dazomet, también podría haber influido en la mejora de la acumulación de pigmentos (Tabla 35). La aplicación de Dazomet pudo haber contribuido a reducir la carga de patógenos y mejorar las condiciones del suelo para el crecimiento y desarrollo de las plantas de espárrago.

Además de los factores mencionados anteriormente, como la falta de tratamiento o el uso de enmiendas orgánicas diferentes, es posible que el estado del suelo afectado por el SDE haya influido en los resultados observados en los diferentes tratamientos. Algunos tratamientos, como la biofumigación con pellets de semillas de *B. carinata* (T2) y la desinfección química con Dazomet (T4), podrían haber contrarrestado los efectos negativos del SDE en el suelo y favorecido la acumulación de pigmentos en las plantas de espárrago.

3.2.2. Hormonas

El objetivo es analizar cómo los tratamientos aplicados (T1, T2, T3 y T4) pueden haber afectado los niveles de hormonas y, a su vez, influir en el rendimiento y la calidad de los cultivos de espárragos (Tablas 36 y 37).

En la parte aérea, los tratamientos T1, T2, T3 y T4 no mostraron diferencias significativas en la mayoría de las hormonas evaluadas en los años 2020 y 2021. Sin embargo, se observó que el tratamiento T3 resultó en mayores niveles de GA4 en comparación con los otros tratamientos (Tabla 37). Esta hormona está asociada con el crecimiento y elongación celular, por lo que un aumento en sus niveles podría tener implicaciones positivas en el crecimiento de las plantas de espárrago.

En cuanto al ácido indolacético (AIA), se observó que los tratamientos T2 y T3 redujeron los niveles de esta hormona en las plantas de espárrago. El AIA es una hormona auxina que desempeña un papel fundamental en el desarrollo de las plantas, incluyendo la regulación del crecimiento y la formación de raíces. La disminución en los niveles de AIA puede tener implicaciones en la morfología y el desarrollo de las plantas tratadas (Tabla 37).

En la parte radicular, en el año 2020 se encontraron mayores niveles de ácido jasmónico (JA) en comparación con el resto de los tratamientos, aunque no se observaron diferencias significativas para el resto de las hormonas (Tabla 37). El JA es una hormona relacionada con las respuestas de defensa de las plantas frente a situaciones de estrés biótico, como infecciones por patógenos. El aumento en los niveles de JA en las plantas tratadas puede indicar una activación del sistema de defensa ante posibles patógenos presentes en el suelo.

Tabla 36. Concentración de fitohormonas en parte radicular de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Hormonas (ng/g PS)											
Parte radicular	ACC	trans-Zeatina	Ribósido de Zeatina	Isopentenil Adenina	GA1	GA3	GA4	Ácido Indolacético	ABA	Ácido Jasmónico	Ácido Salicílico
2020	T1	189,48	65,16	ND	28,73	ND	ND	1,37	4,43	2,20	6,45 ab
	T2	260,95	70,20	ND	18,33	ND	ND	0,82	5,09	2,08	5,03 b
	T3	175,00	83,68	ND	25,48	ND	ND	1,78	4,78	2,32	8,42 a
	T4	280,85	61,08	ND	22,91	ND	ND	0,46	4,97	2,73	6,66 ab
Pvalor		NS	NS	-	NS	-	-	NS	NS	NS	*
2021	T1	237,18	77,76	ND	21,19	ND	ND	0,51	4,39	1,11 b	6,47
	T2	210,20	89,02	ND	17,27	ND	ND	0,44	4,68	0,69 c	5,91
	T3	209,74	83,69	ND	23,95	ND	ND	0,61	5,53	1,14 b	6,09
	T4	273,38	91,97	ND	18,85	ND	ND	0,41	4,86	1,43 a	5,48
Pvalor		NS	NS	-	NS	-	-	NS	NS	***	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. ND (no detectado). Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (T1), biosolarización con pellet de brassicas (T2), biosolarización con pellet de gallinaza (T3) y desinfección química con Basamid (T4).

Tabla 37. Concentración de fitohormonas en parte aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Hormonas (ng/g PS)												
Parte aérea	ACC	trans-Zeatina	Ribósido de Zeatina	Isopentenil Adenina	GA1	GA3	GA4	Ácido Indolacético	ABA	Ácido Jasmónico	Ácido Salicílico	
2020	T1	28,00	10,22	ND	3,81	ND	ND	0,02 b	5,67 a	40,87	31,45	102,63
	T2	22,87	13,09	ND	2,80	ND	ND	0,04 b	4,04 c	46,91	31,02	109,49
	T3	29,93	11,10	ND	4,33	ND	ND	0,07 a	4,50 bc	49,95	34,15	123,64
	T4	29,99	12,31	ND	2,54	ND	ND	0,04 b	5,25 ab	53,66	32,08	128,13
Pvalor	NS	NS	-	NS	-	-	**	**	NS	NS	NS	NS
2021	T1	20,06	9,85	ND	3,90	ND	ND	0,41	8,22	38,07	39,96 a	114,57 b
	T2	24,28	12,83	ND	4,09	ND	ND	0,29	7,78	40,92	28,67 b	125,73 a
	T3	21,47	9,69	ND	3,97	ND	ND	0,55	9,71	32,91	34,47 ab	115,02 b
	T4	19,89	11,48	ND	3,53	ND	ND	0,42	9,83	37,37	39,01 a	128,20 a
Pvalor	NS	NS	-	NS	-	-	NS	NS	NS	*	*	*

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo). P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. ND (no detectado). Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (T1), biosolarización con pellet de brassicas (T2), biosolarización con pellet de gallinaza (T3) y desinfección química con Basamid (T4).

En la parte radicular, el tratamiento T2 disminuyó los niveles de ácido abscísico (ABA), mientras que el tratamiento T4 los aumentó en comparación con el tratamiento T1. El ABA es una hormona que desempeña un papel importante en la respuesta al estrés abiótico, como la sequía y la salinidad. La disminución de los niveles de ABA en las plantas tratadas con T2 podría indicar una menor respuesta al estrés, mientras que el aumento en el tratamiento T4 puede sugerir una mayor sensibilidad y respuesta al estrés abiótico (Tabla 36).

En el año 2021, se encontraron diferencias significativas en la parte aérea para el JA y el ácido salicílico (SA). El tratamiento T2 disminuyó los niveles de JA y aumentó los niveles de SA en comparación con el tratamiento control (Tabla 36). El SA también es una hormona involucrada en las respuestas de defensa de las plantas, especialmente frente a patógenos. Los resultados sugieren que el tratamiento T2 pudo haber estimulado la respuesta de defensa de las plantas de espárrago a través de la regulación de estas hormonas.

En resumen, los resultados obtenidos muestran que los tratamientos aplicados en el estudio pueden influir en los perfiles hormonales de las plantas de espárrago, tanto en la parte aérea como en la radicular. Estos cambios en las hormonas pueden tener implicaciones en el crecimiento, desarrollo y respuestas de defensa de las plantas.

3.2.3. Metabolismo oxidativo

3.2.3.1. Malondialdehído (MDA)

Se analiza la concentración de MDA, un producto secundario de la peroxidación lipídica y un indicador de estrés oxidativo, en la raíz y la parte aérea de las plantas de espárrago durante el primer y segundo año del estudio. El

objetivo es investigar la posible influencia de los tratamientos aplicados en la acumulación de MDA y comprender cómo estos pueden afectar la respuesta oxidativa de las plantas. A través de este análisis, se busca profundizar en la comprensión de los efectos de los tratamientos en el estrés oxidativo de las plantas de espárrago y su relación con la producción de MDA (Tabla 38).

Tabla 38. Valores de concentración de MDA en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

MDA		Raíz (mol/g PF)	Parte aérea (mol/g PF)
2020	T1	22,81	16,57 a
	T2	22,58	16,23 a
	T3	22,60	16,07 a
	T4	20,79	13,67 b
	Pvalor	NS	**
2021	T1	18,00 b	13,45 b
	T2	17,31 b	15,04 ab
	T3	16,35 b	15,60 a
	T4	20,06 a	16,40 a
	Pvalor	***	*

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (T1), biosolarización con pellet de brassicas (T2), biosolarización con pellet de gallinaza (T3) y desinfección química con Basamid (T4).

En el primer año, se observa que el tratamiento T4 muestra una concentración menor de MDA en la raíz en comparación con los tratamientos T1, T2 y T3, aunque estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. Sin embargo, estas diferencias sí que fueron significativas en la parte aérea de la planta (Tabla 38). Esta reducción en la acumulación de MDA en la parte aérea podría estar relacionada con el hecho de que el tratamiento T4 consistió en la desinfección química con Dazomet, un compuesto con propiedades nematicidas y fungicidas. Estudios previos han demostrado que la aplicación de Dazomet puede reducir la carga de patógenos en el suelo y mejorar las condiciones para el crecimiento de las plantas (Dandurand et al., 2018). Al reducir la presencia de

patógenos en la raíz, el tratamiento T4 pudo haber disminuido el estrés biótico y, en consecuencia, la producción de MDA.

En el segundo año, se observa un patrón diferente en la concentración de MDA. El tratamiento T4 muestra una concentración significativamente mayor de MDA tanto en la raíz como en la parte aérea en comparación con los otros tratamientos. Esto puede deberse a la acción del Dazomet en el tratamiento T4. Aunque el Dazomet puede tener efectos beneficiosos en el control de patógenos en la raíz, también puede generar estrés oxidativo en las plantas (Tabla 38). Estudios anteriores han informado que algunos compuestos químicos utilizados en la desinfección del suelo pueden inducir la producción de especies reactivas de oxígeno y provocar estrés oxidativo en las plantas (Hanschen & Winkelmann, 2020). Por lo tanto, es posible que el tratamiento T4 haya provocado un mayor estrés oxidativo, lo que resultó en una mayor producción de MDA en la raíz y la parte aérea.

Esto destaca la importancia de considerar el tiempo y las interacciones complejas entre los tratamientos y las respuestas fisiológicas de las plantas. Los resultados indican que el tratamiento T4, que consistió en la desinfección química con Dazomet, tuvo efectos en la concentración de MDA en las plantas de espárrago. En el primer año, se observó una reducción no significativa de MDA en la parte aérea, posiblemente debido a la disminución del estrés biótico. Sin embargo, en el segundo año, el tratamiento T4 resultó en una mayor producción de MDA, lo que sugiere un posible estrés oxidativo causado por el compuesto químico utilizado. Estos resultados resaltan la importancia de evaluar cuidadosamente los efectos de los tratamientos en diferentes períodos y considerar los posibles efectos secundarios en la fisiología de las plantas.

3.2.3.3. Superóxido dismutasa (SOD)

Se presentan los resultados de dos años de ensayos, donde se evaluaron cuatro tratamientos diferentes y se analizó la concentración de SOD en las raíces y parte aéreas de las plantas de espárrago (Tabla 39).

Tabla 39. Valores de concentración de la actividad SOD en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Super oxido dismutasa (SOD)		Raíz (U/mg prot)	Parte aérea (U/mg prot)
2020	T1	0,22 a	0,058 a
	T2	0,24 a	0,042 b
	T3	0,19 b	0,031 b
	T4	0,23 a	0,040 b
	Pvalor	***	***
2021	T1	0,22 ab	0,036 b
	T2	0,21 b	0,032 b
	T3	0,24 a	0,038 b
	T4	0,24 a	0,046 a
	Pvalor	**	***

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P < 0,05, ** P < 0,01, *** P < 0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (T1), biosolarización con pellet de brassicas (T2), biosolarización con pellet de gallinaza (T3) y desinfección química con Basamid (T4).

En el primer año de estudio, se observa que el tratamiento T3 muestra la menor actividad de SOD en la raíz de la planta. Esto sugiere que las plantas sometidas a este tratamiento tienen una capacidad reducida para contrarrestar el estrés oxidativo asociado con el estrés por deficiencia de hierro (SDE). Es posible que el tratamiento T3 no esté proporcionando los estímulos necesarios para activar adecuadamente los mecanismos de defensa antioxidante en las raíces, lo que resulta en una disminución de la actividad de SOD (Tabla 39). Esta disminución de la actividad de SOD en la raíz puede hacer que las plantas sean más susceptibles al daño oxidativo y tengan una menor capacidad para protegerse contra los radicales libres y otros compuestos oxidativos.

Por otro lado, en la parte aérea de las plantas, se observa que los tratamientos T1 y T3 muestran diferencias significativas en la actividad de SOD

en comparación con los demás tratamientos. El tratamiento T1 exhibe la mayor actividad de SOD en la parte aérea, lo que sugiere que este tratamiento desencadena una respuesta defensiva en las plantas para combatir el estrés oxidativo inducido por el SDE. Es probable que el tratamiento T1 active mecanismos de defensa antioxidante en las plantas, lo que incluye la producción y activación de enzimas como la SOD (Tabla 39). Esta respuesta defensiva puede ser beneficiosa para las plantas, ya que les permite contrarrestar los efectos negativos del estrés oxidativo y mantener un equilibrio redox adecuado en la parte aérea.

En el segundo año de estudio, se observan menores valores de actividad de SOD en las raíces de las plantas que se encontraban en el suelo tratado con pellets de *B. Carinata*. Por otro lado, en la parte aérea de las plantas, se observa una mayor actividad de SOD en el tratamiento T4 en comparación con los demás tratamientos (Tabla 39). Esto sugiere que el tratamiento T4 estimula una mayor producción y activación de la enzima SOD en la parte aérea de las plantas, posiblemente como una respuesta adaptativa al estrés oxidativo.

En resumen, los resultados indican que los tratamientos aplicados pueden tener efectos significativos en la actividad de SOD en diferentes partes de las plantas de espárrago. La menor actividad de SOD en la raíz del tratamiento T3 en el primer año y en las raíces expuestas a los pellets de *B. Carinata* en el segundo año sugiere una menor capacidad antioxidante y una respuesta deficiente al estrés oxidativo en esas condiciones. Por otro lado, la mayor actividad de SOD en la parte aérea en el tratamiento T1 en el primer año y en el tratamiento T4 en el segundo año indica respuestas defensivas y adaptativas de las plantas para contrarrestar el estrés oxidativo en esas situaciones específicas.

3.2.3.2. Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂)

Los valores de concentración de H₂O₂ fueron medidos en raíces y parte aéreas de las plantas. A través de esta tabla, se busca identificar posibles diferencias en la concentración de H₂O₂ entre los tratamientos y comprender su influencia en la respuesta de las plantas de espárrago a los factores bióticos.

Tabla 40. Valores de concentración de H₂O₂ en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

H ₂ O ₂		Raíz (μg/g PF)	Parte aérea (μg/g PF)
2020	T1	19,72 c	26,08 b
	T2	34,77 ab	53,61 a
	T3	40,53 a	48,21 a
	T4	30,91 b	50,95 a
	Pvalor	***	**
2021	T1	23,66 b	40,04
	T2	21,76 b	51,66
	T3	31,46 a	47,11
	T4	18,05 b	35,03
	Pvalor	***	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P < 0,05, ** P < 0,01, *** P < 0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (**T1**), biosolarización con pellet de brassicas (**T2**), biosolarización con pellet de gallinaza (**T3**) y desinfección química con Basamid (**T4**).

En el primer año del estudio, se observaron diferencias significativas en la concentración de H₂O₂ tanto en las raíces como en la parte aérea de las plantas de espárrago entre los diferentes tratamientos (p < 0.05). En las raíces, los tratamientos T2 y T3 mostraron concentraciones más altas de H₂O₂ en comparación con los tratamientos T1 y T4. En la parte aérea, los tres tratamientos de desinfección provocaron un incremento en los niveles de H₂O₂ (Tabla 40).

Estos resultados son consistentes con estudios anteriores que han demostrado que los tratamientos de biofumigación, pueden inducir respuestas de defensa en las plantas, incluida la producción de H₂O₂ (Vargas-Hernandez et

al., 2023). La presencia de compuestos orgánicos en el suelo derivados de estos tratamientos puede estimular la activación de sistemas de defensa en las plantas, lo que resulta en una mayor producción de H_2O_2 .

En el segundo año del estudio, también se encontraron diferencias significativas en la concentración de H_2O_2 entre los tratamientos en las raíces y parte aéreas de las plantas de espárrago ($p < 0.05$). El tratamiento T3 presentó unas concentraciones más altas de H_2O_2 en las raíces, mientras que en la parte aérea no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos estudiados (Tabla 40).

Es importante destacar que altas concentraciones de H_2O_2 pueden tener tanto efectos beneficiosos como perjudiciales en las plantas. Por un lado, el H_2O_2 es un componente clave en las respuestas de defensa de las plantas ante el estrés biótico y abiótico, y puede actuar como una molécula señalizadora en la activación de mecanismos de resistencia y regulación del crecimiento (Jaiswal et al., 2023; Singh & Roychoudhury, 2023). Por otro lado, altas concentraciones de H_2O_2 pueden causar daño oxidativo y estrés oxidativo en las células vegetales.

Los diferentes tratamientos evaluados tuvieron un impacto significativo en la concentración de H_2O_2 en las raíces y parte aéreas de las plantas de espárrago a lo largo de dos años de estudio. Las concentraciones más altas de H_2O_2 sugieren que el tratamiento con pellets de estiércol de gallinaza, puede tener un impacto significativo en la generación de H_2O_2 en las plantas de espárrago. Esto sugiere que este tratamiento puede generar mayores niveles de estrés en las plantas de espárrago.

3.2.3.4. Ascorbato peroxidasa (APX)

Los resultados indican que los tratamientos aplicados tuvieron un impacto significativo en la actividad de la enzima ascorbato peroxidasa (APX) en las raíces y parte aéreas de las plantas de espárrago (Tabla 41). En el primer año, se observó que el tratamiento T4 mostró una actividad más alta de APX en las raíces, lo cual sugiere que este tratamiento podría haber estimulado la actividad de APX en respuesta al estrés oxidativo inducido por el SDE. En la parte aérea, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, lo cual podría indicar una respuesta más equilibrada de las plantas en esa parte del tejido.

Tabla 41. Actividad APX en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Ascorbato peroxidasa (APX)		Raíz ($\Delta\text{Abs min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ prot}$)	Parte aérea ($\Delta\text{Abs min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ prot}$)
2020	T1	0,073 b	0,021
	T2	0,075 ab	0,011
	T3	0,071 b	0,012
	T4	0,095 a	0,014
	Pvalor	*	NS
2021	T1	0,122 a	0,010 b
	T2	0,085 ab	0,011 b
	T3	0,064 b	0,009 ab
	T4	0,069 b	0,015 a
	Pvalor	*	*

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$, y NS (no significativo), $P > 0,05$. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (T1), biosolarización con pellet de brassicas (T2), biosolarización con pellet de gallinaza (T3) y desinfección química con Basamid (T4).

En el segundo año, los tratamientos T1 y T2 destacaron en términos de actividad APX. El tratamiento T1 mostró la actividad más alta de APX en las raíces, lo cual indica una mayor actividad de la enzima y una respuesta adaptativa ante el estrés oxidativo. Por otro lado, el tratamiento T4 exhibió la actividad más alta de APX en la parte aérea, lo que sugiere una respuesta antioxidante más pronunciada en ese tejido (Tabla 41).

Estos resultados pueden tener implicaciones importantes para la capacidad de las plantas de espárrago para contrarrestar el estrés oxidativo inducido por el SDE. La enzima APX juega un papel clave en la eliminación de peróxidos de hidrógeno y otras especies reactivas de oxígeno, protegiendo así a las plantas del daño oxidativo. Un aumento en la actividad de APX, como se observó en los tratamientos T1 y T4, puede indicar una mayor capacidad de las plantas para neutralizar los efectos perjudiciales del estrés oxidativo y mantener un equilibrio redox adecuado (Tabla 41).

Sin embargo, es importante destacar que la respuesta de las plantas a los tratamientos puede ser compleja y estar influenciada por múltiples factores, como la interacción con otros sistemas antioxidantes y la adaptabilidad genética de las variedades de espárrago utilizadas. Además, es necesario considerar que la actividad de APX puede estar regulada por diferentes mecanismos a nivel transcripcional y post-traducciona, lo que puede afectar la expresión y estabilidad de la enzima (Ishikawa & Shigeoka, 2008).

Los tratamientos T4 y T1 destacaron en términos de las actividades de APX en las raíces y parte aérea de las plantas de espárrago, respectivamente (Tabla 41). Estos resultados sugieren que estos tratamientos podrían promover una respuesta antioxidante más robusta y una mayor capacidad de las plantas para enfrentar el estrés oxidativo inducido por el SDE.

3.2.3.5. Ascorbato

Los resultados presentados en la tabla 42 muestran las concentraciones de ascorbato total en las raíces y parte aérea de las plantas de espárrago sometidas a diferentes tratamientos durante dos años de ensayos.

Tabla 42. Valores de concentración de AsA total en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Ascorbato Total		Raíz (mg/g PF)	Parte aérea (mg/g PF)
2020	T1	0,23 b	0,13 b
	T2	0,29 a	0,16 a
	T3	0,24 ab	0,14 ab
	T4	0,28 a	0,15 a
	Pvalor	*	*
2021	T1	0,20	0,17 b
	T2	0,19	0,23 a
	T3	0,18	0,18 b
	T4	0,18	0,20 ab
	Pvalor	NS	**

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (**T1**), biosolarización con pellet de brassicas (**T2**), biosolarización con pellet de gallinaza (**T3**) y desinfección química con Basamid (**T4**).

En el primer año del estudio, se observa que los tratamientos T2, T3 y T4 resultaron en niveles más altos de ascorbato total tanto en la raíz como en la parte aérea en comparación con el tratamiento T1 (Tabla 42). Esto indica que estos tratamientos pueden promover una mayor acumulación de ascorbato en las plantas de espárrago. El ascorbato, también conocido como vitamina C, es un antioxidante importante que juega un papel crucial en la protección contra el estrés oxidativo en las plantas.

La acumulación de ascorbato en respuesta a los diferentes tratamientos puede estar relacionada con la activación de mecanismos de defensa antioxidante en las plantas. Varios estudios han demostrado que el estrés abiótico, como el estrés oxidativo, puede inducir la síntesis y acumulación de ascorbato en las plantas como parte de su respuesta adaptativa (Bashri & Prasad, 2016; Xiao et al., 2021). Los tratamientos T2, T3 y T4 podrían estar generando un nivel más alto de estrés oxidativo en las plantas de espárrago, lo que a su vez desencadena la producción y acumulación de ascorbato como un mecanismo de protección.

Estos resultados sugieren que los tratamientos T2, T3 y T4 pueden tener efectos específicos en la acumulación de ascorbato y en el equilibrio entre las formas oxidada y reducida de este antioxidante en las plantas de espárrago.

3.2.3.6. Glutation (GSH)

El glutatión total (GSH) es un antioxidante crucial en las plantas que juega un papel importante en la protección contra el estrés oxidativo. Se evaluaron diferentes tratamientos para determinar su efecto en los niveles de GSH en las raíces y parte aérea de plantas de espárrago expuestas a un Suelo Fuertemente Afectado (SDE) (Tabla 43).

Tabla 43. Valores de concentración de GSH total en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

GSH		Raíz (mg/g PF)	Parte aérea (mg/g PF)
2020	T1	0,152 a	0,275
	T2	0,153 a	0,264
	T3	0,049 b	0,224
	T4	0,129 a	0,259
	Pvalor	*	NS
2021	T1	0,079 bc	0,446
	T2	0,118 a	0,524
	T3	0,070 c	0,513
	T4	0,091 b	0,463
	Pvalor	***	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (**T1**), biosolarización con pellet de brassicas (**T2**), biosolarización con pellet de gallinaza (**T3**) y desinfección química con Basamid (**T4**).

En el primer año, en la raíz, se observa que los tratamientos T1, T2 y T4 tienen niveles similares de GSH, mientras que el tratamiento T3 muestra un nivel significativamente más bajo (Tabla 43). En la parte aérea, no se observan diferencias significativas entre los tratamientos en términos de los niveles de GSH. Estos resultados indican que el tratamiento T3 puede tener un impacto

negativo en los niveles de GSH en la raíz de las plantas de espárrago, mientras que los demás tratamientos no parecen tener un efecto significativo.

El GSH es un antioxidante crucial en las plantas que juega un papel importante en la protección contra el estrés oxidativo y la regulación del equilibrio redox. Los resultados sugieren que el tratamiento T3 puede tener una influencia negativa en la capacidad de las plantas para mantener niveles adecuados de GSH en la raíz. Esto puede indicar una menor capacidad de las plantas para contrarrestar el estrés oxidativo en la raíz en comparación con los otros tratamientos. Sin embargo, en la parte aérea, no se observan diferencias significativas entre los tratamientos en los niveles de GSH, lo que sugiere que la respuesta antioxidante puede ser diferente en diferentes órganos de la planta.

En el segundo año del estudio, se observa que el tratamiento T2 mostró los niveles más altos de GSH total en las raíces en comparación con los demás tratamientos. Este resultado indica que el tratamiento T2 pudo haber estimulado la acumulación de GSH en las raíces de las plantas (Tabla 43). Un mayor nivel de GSH en las raíces puede indicar una mayor capacidad de las plantas para combatir el estrés oxidativo y mantener la homeostasis redox (Cuypers et al., 2001).

Por otro lado, en la parte aérea no se observaron diferencias significativas en los niveles de GSH entre los tratamientos en el segundo año (Tabla 43). Esto sugiere que los tratamientos aplicados no tuvieron un efecto significativo en la acumulación de GSH en la parte aérea. Es posible que la respuesta del sistema antioxidante en la parte aérea sea menos sensible a los tratamientos aplicados en comparación con las raíces.

En resumen, los resultados obtenidos en el segundo año del estudio indican que el tratamiento T2 mostró los niveles más altos de GSH total en las raíces, lo que sugiere una mayor capacidad antioxidante y protección contra el estrés oxidativo (Tabla 43). Sin embargo, en la parte aérea no se observaron diferencias significativas en los niveles de GSH entre los tratamientos. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar las diferencias en la respuesta antioxidante entre los tejidos de las plantas y la efectividad de los tratamientos aplicados en la estimulación de los mecanismos antioxidantes.

3.2.3.7. Test antioxidantes (FRAP y TEAC)

Los resultados obtenidos en la tabla 44 muestran los valores de FRAP y TEAC en las raíces y parte aéreas de las plantas en los dos años de estudio. El FRAP y el TEAC son ensayos utilizados para evaluar la capacidad antioxidante total de un sistema biológico.

Tabla 44. Actividad antioxidante FRAP y TEAC en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

FRAP		Raíz (mg/g PF)	Parte aérea (mg/g PF)
2020	T1	2,68 c	3,72 c
	T2	3,20 b	4,67 ab
	T3	3,76 a	4,51 b
	T4	3,21 b	5,20 a
	Pvalor	***	***
2021	T1	3,19 a	4,38 bc
	T2	2,94 ab	5,08 a
	T3	2,52 c	4,29 c
	T4	2,73 bc	5,03 ab
	Pvalor	**	*
TEAC		Raíz (mg/g PF)	Parte aérea (mg/g PF)
2020	T1	6,96 c	8,78 a
	T2	7,68 b	8,37 b
	T3	8,33 a	8,84 a
	T4	7,43 bc	8,98 a
	Pvalor	***	*
2021	T1	6,30 a	8,57
	T2	5,66 ab	8,82
	T3	5,31 b	8,60
	T4	5,63 ab	8,63
	Pvalor	*	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P < 0,05, ** P < 0,01, *** P < 0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (T1), biosolarización con pellet de brassicas (T2), biosolarización con pellet de gallinaza (T3) y desinfección química con Basamid (T4).

En el primer año del estudio, se observa que el tratamiento T3 presenta los valores más altos de FRAP en las raíces, mientras que en la parte aérea los tratamientos T2 y T4 muestran los valores más altos. Estos resultados indican que los tratamientos T3 y T4 podrían haber estimulado una mayor capacidad antioxidante en ambos tejidos (Tabla 44). La capacidad antioxidante está asociada con la capacidad de neutralizar los radicales libres y reducir el estrés oxidativo en las células vegetales (Mittler, 2002). Por lo tanto, los tratamientos T3 y T4 pueden haber mejorado la capacidad de las plantas para protegerse contra el estrés oxidativo y mantener un equilibrio redox adecuado en las raíces y parte aéreas.

En el segundo año, los tratamientos T1 y T2 muestran los valores más altos de FRAP en las raíces, mientras que en la parte aérea el tratamiento T2 presenta el valor más alto (Tabla 44). Es importante destacar que el tratamiento T2 muestra consistentemente valores más altos de FRAP en la parte aérea en ambos años de estudio. Esto sugiere que el tratamiento T2 puede tener un efecto particularmente beneficioso en la capacidad antioxidante de la parte aérea.

En cuanto al TEAC, se observa una tendencia similar a la del FRAP en términos de los tratamientos que presentan los valores más altos en los dos años de estudio. El tratamiento T3 exhibe los valores más altos de TEAC en las raíces y parte aéreas en el primer año, mientras que en el segundo año el tratamiento T3 muestra los valores más bajos en las raíces, pero no se observan diferencias significativas en la parte aérea (Tabla 44).

En general, los resultados indican que los tratamientos T3 y T4 pueden tener un impacto positivo en la capacidad antioxidante de las plantas, especialmente en las raíces. Estos tratamientos podrían estar estimulando la producción de compuestos antioxidantes y mejorando la defensa antioxidante de las plantas contra el estrés oxidativo.

3.2.3.8. Resumen

El tratamiento T4, que implica la desinfección química con Dazomet, mostró resultados prometedores en varios parámetros relacionados con el estrés oxidativo y la respuesta antioxidante en las plantas de espárrago. En primer lugar, se observó una reducción significativa en la acumulación de MDA en las raíces en comparación con los otros tratamientos, lo que indica una menor producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y daño oxidativo en las

membranas celulares. Además, el tratamiento T4 mostró una mayor actividad de la enzima APX en las raíces en comparación con otros tratamientos, lo que implica una respuesta antioxidante más activa y una mejor capacidad para neutralizar el H₂O₂. Asimismo, el tratamiento T4 exhibió una mayor acumulación de ascorbato en las raíces en comparación con otros tratamientos, lo que indica una mayor capacidad de las plantas para contrarrestar los efectos negativos de los ROS.

En relación con los niveles de GSH, en el primer año de estudio se observa que los tratamientos T1, T2 y T4 tienen niveles similares de GSH en las raíces, mientras que el tratamiento T3 muestra un nivel significativamente más bajo. Esto indica que el tratamiento T3 puede tener un impacto negativo en los niveles de GSH en la raíz de las plantas de espárrago, mientras que los demás tratamientos no parecen tener un efecto significativo.

En el segundo año de estudio, el tratamiento T2 muestra los niveles más altos de GSH total en las raíces en comparación con los demás tratamientos, lo que indica una mayor capacidad de las plantas para combatir el estrés oxidativo y mantener la homeostasis redox. Además, en términos de capacidad antioxidante, tanto en el FRAP como en el TEAC, los tratamientos T2 y T4 presentan los valores más altos en la parte aérea durante los dos años de estudio. Esto sugiere que el tratamiento T2 puede tener un efecto particularmente beneficioso en la capacidad antioxidante de la parte aérea.

En resumen, el tratamiento T4 con Dazomet mostró una reducción en la acumulación de MDA, una mayor actividad de APX y una mayor acumulación de ascorbato en las raíces de las plantas de espárrago. Además, el tratamiento T2 destacó en los resultados debido a su efecto positivo en los niveles de GSH en

las raíces y en la capacidad antioxidante de la parte aérea. Estos hallazgos sugieren que el tratamiento T2 y el tratamiento T4 con Dazomet pueden ser beneficiosos para proteger las plantas de espárrago contra el estrés oxidativo y mantener un equilibrio redox adecuado.

3.2.4. Metabolismo de fenoles.

3.2.4.1. Fenoles totales

Se evaluó el contenido de fenoles totales en las raíces y parte aéreas de las plantas de espárrago tratadas con diferentes estrategias de control. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla, donde se presentan los valores medios de fenoles totales para cada tratamiento y año de estudio, así como los valores de p-valor que indican la significancia estadística de las diferencias observadas (Tabla 45).

Tabla 45. Valores de concentración de fenoles totales en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Fenoles Totales		Raíz (mg/g PF)	Parte aérea (mg/g PF)
2020	T1	3,72 a	0,82 c
	T2	3,87 a	1,04 a
	T3	3,68 a	0,85 bc
	T4	3,26 b	0,92 b
	Pvalor	***	***
2021	T1	3,32 a	0,88 ab
	T2	3,01 ab	0,96 a
	T3	2,76 b	0,77 b
	T4	3,15 a	0,81 b
	Pvalor	**	*

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (T1), biosolarización con pellet de brassicas (T2), biosolarización con pellet de gallinaza (T3) y desinfección química con Basamid (T4).

En cuanto a las raíces, se observó que, en el primer año de estudio, los tratamientos T1, T2 y T3 presentaron niveles similares de fenoles totales, siendo significativamente más altos que el tratamiento T4. Estos resultados indican que la fumigación química (T4) pudo haber tenido un efecto negativo en la

acumulación de fenoles totales en las raíces. Por otro lado, en el segundo año de estudio, se encontró que los tratamientos T1, T2 y T4 mostraron niveles similares de fenoles totales, mientras que el tratamiento T3 presentó niveles significativamente más bajos (Tabla 45). Estos resultados sugieren que el aporte de enmiendas orgánicas combinado con la solarización del suelo (T3) pudo no haber favorecido la acumulación de fenoles totales en las raíces.

En cuanto a las parte aéreas, se observaron patrones similares a los encontrados en las raíces. En el primer año de estudio, los tratamientos T1, T3 y T4 mostraron niveles similares de fenoles totales, mientras que el tratamiento T2 presentó niveles significativamente más altos (Tabla 45). En el segundo año de estudio, los tratamientos T1, T3 y T4 presentaron niveles similares de fenoles totales, siendo significativamente más bajos que en el tratamiento T2. Estos resultados indican que la estrategia de aporte de enmiendas orgánicas con *B. carinata* combinado con la solarización del suelo (T2) pudo haber favorecido la acumulación de fenoles totales en la parte aérea (Tabla 45).

La acumulación de fenoles totales en las plantas de espárrago puede tener implicaciones importantes en la respuesta de las plantas frente a estrés biótico y abiótico. En este sentido, los resultados obtenidos en este estudio indican que los tratamientos T2 y T4 podrían favorecer una mayor acumulación de fenoles totales en las raíces y parte aéreas de las plantas de espárrago, lo cual podría contribuir a una mayor resistencia frente al SDE.

3.3.4.2. Polifenol oxidasa (PPO)

Se evaluó la actividad de la enzima polifenol oxidasa (PPO) en las raíces y parte aéreas de las plantas de espárrago tratadas con diferentes estrategias

de control. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla, donde se muestran los valores medios de actividad de PPO para cada tratamiento y año de estudio (Tabla 46).

Tabla 46. Actividad PPO en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

PPO		Raíz ($\Delta\text{Abs min}^{-1} \text{mg}^{-1} \text{prot}$)	Parte aérea ($\Delta\text{Abs min}^{-1} \text{mg}^{-1} \text{prot}$)
2020	T1	0,119 ab	0,151
	T2	0,125 a	0,140
	T3	0,111 b	0,138
	T4	0,126 a	0,145
	Pvalor	*	NS
2021	T1	0,127 b	0,141
	T2	0,126 b	0,155
	T3	0,122 b	0,150
	T4	0,138 a	0,134
	Pvalor	*	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$, y NS (no significativo), $P > 0,05$. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (**T1**), biosolarización con pellet de brassicas (**T2**), biosolarización con pellet de gallinaza (**T3**) y desinfección química con Basamid (**T4**).

En cuanto a las raíces, se observó que, en el primer año de estudio, los tratamientos T1, T2 y T4 mostraron niveles similares de actividad de PPO, mientras que el tratamiento T3 presentó una actividad significativamente más baja (Tabla 46). Estos resultados sugieren que la estrategia de aporte de enmiendas orgánicas con pellets de gallinaza, combinado con la solarización del suelo (T3) pudo haber tenido un efecto inhibitor en la actividad de PPO en las raíces. Por otro lado, en el segundo año de estudio, se encontró que el tratamiento T4 mostró niveles superiores de actividad PPO, en comparación con el resto de tratamientos (Tabla 46).

En cuanto a las parte aéreas, en ningún año del estudio se observaron diferencias significativas en los tratamientos estudiados lo que sugiere que las distintas técnicas de biosolarización no afectan a la actividad PPO en esta parte de la planta (Tabla 46).

La disminución de la actividad de PPO en el tratamiento T3 podría indicar una reducción en la capacidad de las plantas para defenderse frente a agentes patógenos y estrés oxidativo, lo cual podría hacerlas más susceptibles al SDE. Por otro lado, los tratamientos T2 y T4 que implican el control biótico con pellets de semillas de *B. carinata* o Dazomet, muestran niveles similares de actividad de PPO en general, lo que sugiere una respuesta más favorable frente al SDE (Tabla 46).

3.2.4.3. Perfil de fenoles

Se realizaron análisis de los niveles de ácidos fenólicos y flavonoles en la parte aérea y radicular de las plantas de espárrago sometidas a diferentes tratamientos (Tablas 47 y 48). Estos compuestos son conocidos por su importancia en la respuesta antioxidante y defensa de las plantas ante el estrés abiótico y biótico.

Ácidos Fenólicos

En cuanto a la raíz, se observó que el tratamiento T2 fue el que produjo los menores niveles de ácido cafeico, mientras que el tratamiento T4 presentó los mayores niveles para este compuesto (Tabla 47). Estos resultados podrían estar relacionados con la capacidad de cada tratamiento para influir en la síntesis y acumulación de ácido cafeico en las raíces de las plantas de espárrago.

En el año 2021, se observaron patrones similares en la parte aérea, donde el tratamiento T3 presentó los mayores niveles de feruloil-deriv en comparación con los demás tratamientos (Tabla 47). Esto indica una posible respuesta específica de las plantas de espárrago a las condiciones proporcionadas por este tratamiento durante ese año. En cuanto a la raíz, el tratamiento T1 mostró los mayores niveles de ácido cafeico hex, lo cual puede indicar una influencia particular de este tratamiento en la síntesis de este compuesto fenólico en las raíces (Tabla 47).

En el suelo, se observó que, en el año 2020, los tratamientos T3 y T4 mostraron los menores niveles de feruloil-deriv en comparación con los tratamientos T1 y T2 (Tabla 47). Esto puede deberse a diferencias en la disponibilidad de sustratos o a la interacción de los tratamientos con las propiedades del suelo. En el año 2021, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para este compuesto fenólico en el suelo, lo cual puede indicar una estabilidad en su concentración independientemente de los tratamientos aplicados (Tabla 47).

Estos resultados sugieren que los tratamientos aplicados tienen un efecto diferencial en los niveles de ácidos fenólicos en las diferentes partes de las plantas de espárrago, lo cual puede estar relacionado con la capacidad de cada tratamiento para modular la síntesis y acumulación de estos compuestos. La síntesis y acumulación de ácidos fenólicos en las plantas están reguladas por una serie de factores, incluyendo la expresión de genes clave involucrados en la vía biosintética de fenilpropanoides y la activación de rutas de señalización en respuesta al estrés (Naikoo et al., 2019). Es posible que el tratamiento T4 haya estimulado la expresión de estos genes y la activación de rutas de señalización

relacionadas con la biosíntesis de ácidos fenólicos en las plantas de espárrago, lo que resultó en niveles más altos de estos compuestos.

Por otro lado, los niveles de ácidos fenólicos en la parte radicular de las plantas de espárrago fueron generalmente más bajos que en la parte aérea (Tabla 47). Esto puede estar relacionado con las diferencias en la distribución y acumulación de compuestos fenólicos en diferentes tejidos de la planta. Se sabe que la parte aérea de las plantas, como parte aéreas y tallos, es un sitio principal de síntesis y acumulación de compuestos fenólicos, mientras que las raíces generalmente contienen niveles más bajos de estos compuestos (Cheynier et al., 2013).

Tabla 47. Valores de concentración de ácidos fenólicos en suelo, parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante el primer y segundo año de estudio (2020-2021).

Ácidos Fenólicos (mg/g PF)								
Suelo		3-CQA	4-CQA	Ácido cafeico hex	Ácido cafeico	Feruloil-QA	p-Cum.-deriv	Feruloil-deriv.
2020	T1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,02 a
	T2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,02 a
	T3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,01 b
	T4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,01 b
	Pvalor	-	-	-	-	-	-	***
2021	T1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,11
	T2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,09
	T3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,09
	T4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,08
	Pvalor	-	-	-	-	-	-	NS
Parte radicular		3-CQA	4-CQA	Ácido cafeico hex	Ácido cafeico	Feruloil-QA	p-Cum.-deriv	Feruloil-deriv.
2020	T1	ND	ND	0,74	3,40 ab	ND	ND	ND
	T2	ND	ND	0,57	3,00 c	ND	ND	ND
	T3	ND	ND	0,67	3,17 bc	ND	ND	ND
	T4	ND	ND	0,57	3,58 a	ND	ND	ND
	Pvalor	-	-	NS	**	-	-	-
2021	T1	ND	ND	0,88 a	3,52	ND	ND	ND
	T2	ND	ND	0,69 ab	3,38	ND	ND	ND
	T3	ND	ND	0,51 ab	3,55	ND	ND	ND
	T4	ND	ND	0,39 b	3,96	ND	ND	ND
	Pvalor	-	-	*	NS	-	-	-
Parte aérea		3-CQA	4-CQA	Ácido cafeico hex	Ácido cafeico	Feruloil-QA	p-Cum.-deriv	Feruloil-deriv.
2020	T1	0,38	0	ND	ND	0,13 bc	0,43 b	0,12 b
	T2	0,26	0,05	ND	ND	0,08 c	0,41 b	0,10 b
	T3	0,22	0	ND	ND	0,22 a	0,47 b	0,12 b
	T4	0,56	0	ND	ND	0,16 ab	0,78 a	0,25 a
	Pvalor	NS	*	-	-	**	***	**
2021	T1	0,73	0,19	ND	ND	ND	0,13	0,46 ab
	T2	0,66	0,20	ND	ND	ND	0,09	0,31 b
	T3	0,68	0,21	ND	ND	ND	0,16	0,61 a
	T4	0,56	0,20	ND	ND	ND	0,09	0,33 b
	Pvalor	NS	NS	-	-	-	NS	*

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P < 0,05, ** P < 0,01, *** P < 0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. ND (no detectado). Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (**T1**), biosolarización con pellet de brassicas (**T2**), biosolarización con pellet de gallinaza (**T3**) y desinfección química con Basamid (**T4**).

Flavonoles

Los datos se presentan para dos años de estudio (2020 y 2021) y cuatro tratamientos diferentes (T1, T2, T3, T4). Los flavonoles analizados incluyen apigenina diglucósido (Vicenin2), quercetina rutinósido hexósido (Q-Rut-hex), quercetina rutinósido (Q-Rutina), rutina de kaempferol (Kaemp Rut.), derivados de quercetina rutinósido (Q-rut-deriv.), isorhamnetina rutinósido (Isorhamnetina Rut) e isorhamnetina hexósido (Isorhamnetina hex). (Tabla 48).

En el año 2020, se observaron diferencias significativas en los contenidos de algunos flavonoles entre los tratamientos. El tratamiento T1 mostró el contenido más alto de apigenina diglucósido (Vicenin2) y los derivados de Q-rut-deriv, lo cual sugiere una mayor acumulación de estos compuestos bajo las condiciones proporcionadas por dicho tratamiento. Por otro lado, el tratamiento T2 exhibió el contenido más bajo de Q-Rutina, indicando una posible influencia negativa de este tratamiento en la síntesis o estabilidad de este flavonol en particular. Se encontraron diferencias significativas en los tratamientos T2 y T4, donde se observaron los niveles más altos de quercetina Q-Rut-hex, siendo el tratamiento T4 el que presentó los mayores niveles de Q-Rut y Kaemp Rut. Además, los tratamientos T3 y T4 mostraron los mayores niveles de Isorhamnetina hex, lo cual indica una posible inducción de la síntesis de este flavonol en respuesta a las condiciones proporcionadas por estos tratamientos (Tabla 48).

En el año 2021, también se encontraron diferencias significativas en los contenidos de algunos flavonoles entre los tratamientos. El tratamiento T1 mostró el contenido más alto de apigenina diglucósido (Vicenin2), mientras que el tratamiento T4 mostró el contenido más bajo para este flavonol. Asimismo, se

observaron diferencias significativas en los contenidos de Q-Rutina, siendo los tratamientos T1 y T3 los que presentaron los valores más altos (Tabla 48). Estos resultados sugieren que los tratamientos aplicados pueden tener un impacto en la acumulación de flavonoles en las plantas de espárrago y que diferentes tratamientos pueden afectar de manera distinta la síntesis y acumulación de flavonoles específicos.

Por otro lado, en la parte radicular, los flavonoles analizados se encontraron por debajo del nivel de detección tanto en el año 2020 como en el año 2021 (Tabla 48). Esto indica que los niveles de flavonoles en las raíces de las plantas de espárrago fueron muy bajos o inexistentes en las condiciones y tratamientos evaluados en este estudio. Por lo tanto, no se pueden realizar comparaciones ni determinar diferencias estadísticamente significativas en cuanto a los contenidos de flavonoles en la parte radicular.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que los tratamientos aplicados a las plantas de espárrago pueden influir en los niveles de flavonoles en la parte aérea, pero no se observaron diferencias significativas en la parte radicular. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas que han demostrado que los tratamientos agronómicos pueden tener efectos sobre la acumulación de compuestos fenólicos en las plantas (Treutter, 2010).

Tabla 48. Valores de concentración de flavonoles en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante el primer y segundo año de estudio (2020-2021).

		Flavonoles (mg/g PF)						
Parte radicular		Apigenina digluc (Vicenín2)	Q-Rut-hex	Q-Rutinæ	Kaemp Rut.	Q-rut-deriv.	Isorhamnetina Rut	Isorhamnetina hex
2020	T1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	T2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	T3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	T4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Pvalor	-	-	-	-	-	-	-
2021	T1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	T2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	T3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	T4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Pvalor	-	-	-	-	-	-	-
Parte aérea		Apigenina digluc (Vicenín2)	Q-Rut-hex	Q-Rutinæ	Kaemp Rut.	Q-rut-deriv.	Isorhamnetina Rut	Isorhamnetina hex
2020	T1	1,93	0,27 b	9,70 b	0,56 a	0,20 a	0,57	0,16 b
	T2	1,56	0,56 a	8,95 c	0,44 b	0 b	0,51	0,10 b
	T3	1,62	0,16 b	9,48 bc	0,53 ab	0 b	0,57	0,36 a
	T4	1,90	0,55 a	10,60 a	0,63 a	0,10 ab	0,63	0,43 a
	Pvalor	NS	***	***	*	*	NS	***
2021	T1	1,04 a	ND	5,51 a	0,29	ND	0,15	ND
	T2	0,78 b	ND	4,68 b	0,24	ND	0,07	ND
	T3	0,85 ab	ND	5,23 a	0,24	ND	0,17	ND
	T4	0,71 b	ND	4,75 b	0,26	ND	0,11	ND
	Pvalor	*	-	**	NS	-	NS	-

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. ND (no detectado). Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (**T1**), biosolarización con pellet de brassicas (**T2**), biosolarización con pellet de gallinaza (**T3**) y desinfección química con Basamid (**T4**).

En términos de determinar el tratamiento más representativo, es importante considerar los resultados obtenidos en ambos estudios y comparar los niveles de los compuestos fenólicos en las diferentes partes de las plantas de espárrago. Si nos basamos en los resultados presentados, el tratamiento T4 parece ser el más representativo en términos de acumulación de compuestos fenólicos. En el estudio de ácidos fenólicos, el tratamiento T4 mostró los mayores niveles de ácido cafeico en la raíz y de p-cum deriv y feruloil-deriv en la parte aérea (Tabla 47). En el estudio de flavonoles, el tratamiento T4 presentó los mayores niveles de quercetina rutinósido (Q-Rut) y rutina de kaempferol (Kaemp Rut) en la parte aérea (Tabla 48). Estos resultados indican que el tratamiento T4 tiene un efecto significativo en la acumulación de compuestos fenólicos en diferentes partes de las plantas de espárrago.

La explicación de estos resultados puede estar relacionada con la composición y el mecanismo de acción de los tratamientos aplicados. Es posible que el tratamiento T4 proporcione condiciones favorables para la biosíntesis y acumulación de compuestos fenólicos en las plantas de espárrago. Además, otros factores como la genética de las plantas y las condiciones ambientales también pueden influir en la acumulación de compuestos fenólicos.

3.2.5. Nutrientes

En el análisis de los contenidos de nutrientes en la parte aérea y raíces de las plantas de espárrago, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 49). Estos resultados son relevantes ya que los nutrientes desempeñan un papel crucial en el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como en su capacidad para resistir enfermedades y estrés abiótico.

En el primer año, se encontraron diferencias significativas en los contenidos de calcio (Ca) en la parte aérea. Los tratamientos T2 y T4 mostraron valores más altos de Ca en comparación con T1 y T3 (Tabla 49). El calcio es un elemento esencial para el desarrollo estructural de las plantas y desempeña un papel importante en la respuesta de defensa ante patógenos y enfermedades (Lecourieux et al., 2006). Un mayor contenido de Ca en la parte aérea podría indicar una mayor resistencia de las plantas al SDE. Estos resultados coinciden con estudios previos que han demostrado la importancia del calcio en la respuesta de las plantas a patógenos (Zhang et al., 2014). Además, se observó un mayor contenido de Mn en las plantas del tratamiento T4, lo que también podría contribuir a la mejora frente al SDE (Tabla 49).

Se observó una diferencia significativa en el contenido de hierro (Fe) en la parte aérea entre los tratamientos. Los tratamientos T2 y T4 mostraron un valor significativamente más alto de Fe en comparación con los demás tratamientos (Tabla 49). El Fe es un micronutriente esencial para numerosas funciones fisiológicas en las plantas, incluyendo la síntesis de clorofila y la participación en procesos de defensa antioxidante (Kasote et al., 2019). Un mayor contenido de Fe en la parte aérea puede conferir una mayor capacidad de las plantas para resistir el estrés oxidativo (Tewari et al., 2005) y, por lo tanto, fortalecer su respuesta al SDE.

En cuanto a los contenidos de nutrientes en las raíces, se observaron diferencias significativas en los contenidos de potasio (K) y fósforo (P) entre los tratamientos. En el primer año, los tratamientos T2, T3 y T4 presentaron un mayor contenido de K en las raíces en comparación con T1 (Tabla 49). El potasio es un nutriente esencial para la función celular y el transporte de agua en las

plantas, además de desempeñar un papel importante en la respuesta a estrés biótico y abiótico (Imtiaz et al., 2022). Un mayor contenido de K en las raíces podría contribuir a una mejor adaptación de las plantas al SDE. Además, los tratamientos T2 y T4 aumentaron los niveles de Mg en las raíces (Tabla 49).

En el segundo año, se encontraron diferencias significativas en el contenido de fósforo (P) en las raíces entre los tratamientos. Los tratamientos T1 y T2 mostraron un valor más alto de P en comparación con el resto de tratamientos (Tabla 49). El fósforo es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como para la transferencia de energía y la síntesis de biomoléculas (Lambers, 2022). Un mayor contenido de P en las raíces puede proporcionar una mayor capacidad de las plantas para resistir el estrés y mejorar su rendimiento. Los tres tratamientos de desinfección aumentaron los niveles de Mg en parte aérea (Tabla 49).

En general, los resultados indican que algunos tratamientos, en especial, los tratamientos T2 y T4, presentan diferencias significativas en los contenidos de nutrientes en la parte aérea y raíces de las plantas de espárrago. Por otra parte, cabe destacar que el tratamiento T3 tuvo menores niveles de varios nutrientes lo que podría dar explicación a su menor rendimiento general. Estas diferencias podrían estar relacionadas con la capacidad de las plantas para resistir el SDE.

Tabla 49. Valores de concentración de nutrientes en parte radicular y aérea de espárrago, sometidos a los distintos tratamientos ensayados durante dos años de estudio (2020-2021).

Nutrientes											
2020	P	K	S	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	
Raiz	T1	1,30 a	17,37 b	3,14	4,12 b	1,85 bc	38,81	23,39	8,19	3,86	
	T2	1,27 ab	20,90 a	3,39	6,10 a	2,38 ab	44,57	23,84	8,35	4,19	
	T3	1,11 bc	21,52 a	3,37	5,49 ab	1,70 c	43,64	21,54	8,01	3,49	
	T4	1,05 c	21,05 a	3,23	6,38 a	2,48 a	45,91	22,99	7,43	4,28	
	Pvalor	**	*	NS	*	*	NS	NS	NS	NS	
Parte aérea	T1	1,33	20,08	4,23	7,01 b	1,80 b	56,75 b	27,71	8,16	27,25 ab	
	T2	1,27	19,16	3,68	7,64 ab	2,00 ab	53,68 b	24,30	7,96	27,14 ab	
	T3	1,30	20,53	4,02	7,28 b	2,21 a	55,84 b	23,02	7,68	24,10 b	
	T4	1,34	20,41	4,34	8,69 a	2,25 a	73,92 a	23,18	8,37	32,52 a	
	Pvalor	NS	NS	NS	*	*	***	NS	NS	*	
2021	P	K	S	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	
Raiz	T1	1,15 a	12,26 a	2,97	5,29	1,69	68,19	27,91 a	8,83	4,97	
	T2	1,14 a	12,36 a	2,97	4,79	1,66	64,22	26,32 a	8,13	4,53	
	T3	1,08 ab	12,45 a	3,02	4,80	1,56	62,51	25,67 ab	8,74	4,62	
	T4	0,94 b	10,38 b	2,74	4,44	1,51	63,21	22,36 b	7,98	3,77	
	Pvalor	*	***	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	
Parte aérea	T1	1,80 a	14,87	4,13 a	5,37 a	0,79 b	58,81 a	31,79 a	8,25 a	36,33 a	
	T2	1,86 a	14,70	3,40 b	3,50 b	1,04 a	36,16 c	29,37 a	7,36 b	19,67 c	
	T3	1,76 ab	14,15	4,18 a	4,92 a	1,04 a	61,76 a	25,25 b	7,96 ab	30,52 ab	
	T4	1,49 b	14,17	3,24 b	4,69 a	1,05 a	48,31 b	21,83 c	7,23 b	25,51 bc	
	Pvalor	*	NS	**	***	**	***	***	*	***	

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (T1), biosolarización con pellet de brassicas (T2), biosolarización con pellet de gallinaza (T3) y desinfección química con Basamid (T4).

3.3. Cosecha y calidad

3.3.1. Cosecha

Se presentan los datos de rendimiento comercial y no comercial obtenidos a lo largo de tres años de estudio (Tabla 50). Estos datos reflejan la cantidad de producto recolectado por hectárea bajo los cuatro tratamientos evaluados en el marco de la investigación. El análisis de estos resultados permitirá analizar y comparar el efecto de los tratamientos, brindando información relevante para el estudio.

Tabla 50. Valores acumulados (kg/ha) de rendimiento comercial y no comercial al final del periodo de cosecha de los años 2019, 2020 y 2021.

Rendimiento Comercial (Kg/ha)	T1	T2	T3	T4	P-valor
2019	164,99	160,73	117,43	145,46	NS
2020	872,90	990,85	926,06	866,79	NS
2021	2793,58 b	3793,18 a	3362,38 ab	3097,45 b	*
Rendimiento No Comercial (Kg/ha)	T1	T2	T3	T4	P-valor
2019	19,74	22,20	16,14	15,91	NS
2020	13,35	12,74	20,60	10,85	NS
2021	142,92	174,12	157,38	144,25	NS

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P < 0,05, ** P < 0,01, *** P < 0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (**T1**), biosolarización con pellet de brassicas (**T2**), biosolarización con pellet de gallinaza (**T3**) y desinfección química con Basamid (**T4**).

En cuanto al rendimiento comercial, se observa que, en el año 2019, todos los tratamientos (T1, T2, T3 y T4) presentaron valores similares, sin encontrarse diferencias significativas entre ellos ($p > 0.05$) (Tabla 50). Esto sugiere que ninguno de los tratamientos aplicados tuvo un impacto significativo en el rendimiento comercial del cultivo de espárragos en ese año.

Sin embargo, en el año 2020, se observa un aumento en el rendimiento comercial en los tratamientos T2 y T3, aunque sin diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$), lo que indica que, aunque ya hay una tendencia hacia un mayor rendimiento en los tratamientos con biofumigación (T2 y T3, no se puede establecer una diferencia clara en términos de rendimiento comercial entre los tratamientos (Tabla 50).

En el año 2021, se evidencia un incremento significativo en el rendimiento comercial en los tratamientos T2 y T3, significativamente superiores a los otros dos con 3.793 kg/ha y 3.362 kg/ha, respectivamente, mientras que los tratamientos T4 y T1 sólo alcanzaron 3.097 y 2.976 kg/ha, respectivamente (Tabla 50). Estos resultados indican que la biofumigación con pellets de semillas de *Brassica carinata* (T2) y la biofumigación con pellets de estiércol de gallinaza (T3) presentan distintos grados de efectividad para mejorar el rendimiento comercial del cultivo de espárragos en plantaciones con el SDE, en comparación con el control sin ninguna aplicación (T1) (Tabla 50). La efectividad de la desinfección química con Dazomet (T4) es significativamente menor que las biofumigaciones.

En cuanto al rendimiento no comercial, no se observan diferencias significativas entre los tratamientos a lo largo de los tres años ($p > 0.05$) (Tabla 50). Esto sugiere que los diferentes métodos de control no tuvieron un impacto significativo en el rendimiento de espárragos que no cumplen con los estándares comerciales.

La evolución del rendimiento comercial y no comercial a lo largo del tiempo para los tres ciclos de cultivo, se presentan en las Figuras 35 y 36.

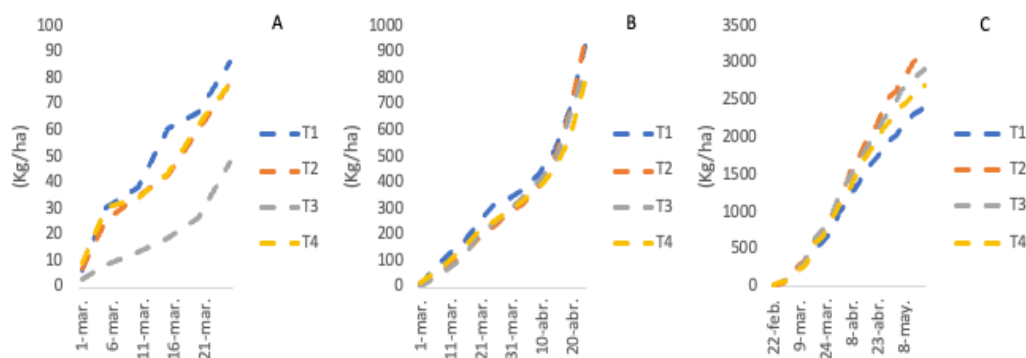


Figura 35. Evolución del rendimiento comercial (Kg/ha) de tratamientos T1, T2, T3 y T4 a lo largo del tiempo de cosecha durante 3 años de ensayo (2019, 2020 y 2021). A) Rendimiento comercial en 2019 B) Rendimiento comercial en 2020 C) Rendimiento comercial en 2021.

No se observan variaciones destacables en la pendiente de las curvas para ninguno de los tratamientos, siguiendo patrones muy similares los cuatro tratamientos en los tres ciclos de cultivo. Se puede apreciar el incremento productivo que se produce entre ciclos y que previsiblemente continuaría hasta alcanzar el periodo de plena producción para las plantas de espárrago al que se llega aproximadamente entre el cuarto y sexto año desde la plantación(D. Drost, 2023).

Con respecto a la relación entre el rendimiento no comercial y el rendimiento comercial, en el año 2019, el rendimiento no comercial representó aproximadamente el 11,95%, 13,79%, 13,76% y 10,94%, respectivamente, del rendimiento comercial total para T1, T2, T3 y T4, respectivamente Figuras 35 y 36.

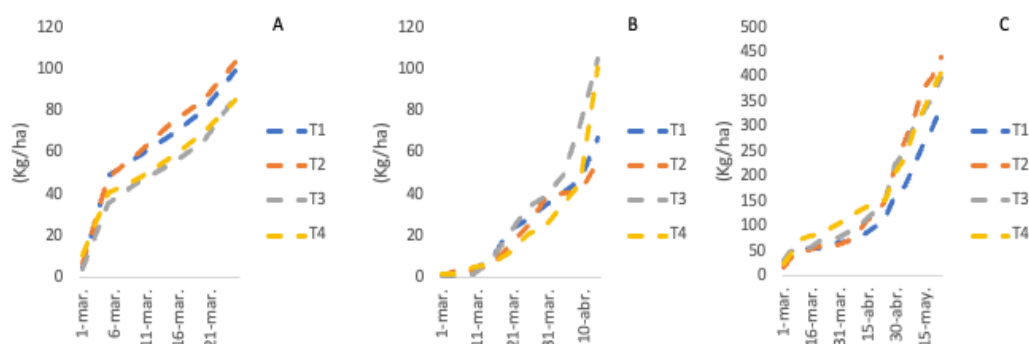


Figura 36. Evolución del rendimiento no comercial (Kg/ha) de tratamientos T1, T2, T3 y T4 a lo largo del tiempo de cosecha durante 3 años de ensayo (2019, 2020 y 2021). A) Rendimiento no comercial en 2019 B) Rendimiento no comercial en 2020 C) Rendimiento no comercial en 2021.

En el año 2020, se produce una reducción muy importante en la proporción de turiones no comerciales que representan aproximadamente el 1,53%, 1,29%, 2,23% y 1,25% para T1, T2, T3 y T4 Tabla 50, respectivamente del rendimiento comercial total.

En el año 2021, estos valores fueron de 5,12%, 5,62%, 4,67% y 3,79% (Tabla 50), lo que supone un incremento con respecto al año anterior debido posiblemente a una alta incidencia de pulgón y rosquilla durante ese ciclo de cultivo. En resumen, los resultados obtenidos en este análisis comparativo de los tratamientos para el control del síndrome del decaimiento del espárrago demuestran la importancia de considerar estrategias enfocadas al control biótico. En el tratamiento T1, que consistió en el control sin tratar, se observaron rendimientos comerciales consistentemente más bajos a partir del segundo año en comparación con los demás tratamientos (Tabla 50). Esto podría sugerir que la falta de medidas de control permitió que los microorganismos patógenos que la bibliografía apunta como co-causantes del síndrome afectaran negativamente el rendimiento (de la Lastra, Marín-Guirao, et al., 2021).

Por otro lado, el tratamiento T2, biosolarización con pellets de semillas de *B. carinata*, mostró un rendimiento comercial relativamente estable en los tres años (Tabla 50). La presencia de compuestos bioactivos en este tratamiento podría haber contribuido a la supresión de los factores bióticos y al mantenimiento del rendimiento (Castillo-Díaz et al., 2022).

De manera similar, el tratamiento T3, que incluyó la biosolarización con pellets de estiércol de gallinaza, también presentó rendimientos comerciales consistentes en los tres años (Tabla 50). Es probable que el contenido de nutrientes y compuestos orgánicos presentes en el estiércol de gallinaza haya mejorado la salud de las plantas, lo que se tradujo en un efecto favorable sobre el rendimiento.

En resumen, los resultados indican que los tratamientos que involucraron medidas de control biológico (T2 y T3) o químico (T4) mostraron mejoras en el rendimiento en comparación con el control sin tratar (T1). Estos hallazgos respaldan la eficacia de las estrategias de control propuestas para el control de los factores bióticos causantes del síndrome del decaimiento en las plantaciones de espárragos.

3.3.2. Calidad

Se han evaluado los efectos de los tratamientos ensayados sobre diversas características de interés de los turiones de espárrago. La tabla 51 muestra los resultados obtenidos en términos de peso unitario, diámetro intermedio, dureza, volumen unitario, contenido de sólidos solubles (°Brix) y jugosidad. A través de un análisis detallado de estos datos, se buscará

establecer relaciones y tendencias entre los tratamientos, así como proporcionar una explicación científica sobre los resultados observados.

Tabla 51. Parámetros de calidad medidos en los turiones cosechados de las plantas sometidas a los distintos tratamientos del estudio durante los años 2019, 2020 y 2021.

		Peso unitario (g)	Diámetro Intermedio (mm)	Dureza (g/cm ²)	Volumen unitario (dm ³)	°Brix	Jugosidad (%)
2019	T1	8,64 b	5,86 c	-	20,30 c	5,83 b	-
	T2	25,58 a	12,61 a	-	23,09 ab	5,70 c	-
	T3	19,90 a	10,62 b	-	21,07 bc	5,70 c	-
	T4	23,30 a	11,44 ab	-	23,92 a	6,20 a	-
	Pvalor	***	***	-	*	***	-
2020	T1	19,70	10,48	445,72	66,38	4,69	12,71
	T2	23,25	12,61	422,99	75,31	4,71	13,58
	T3	19,90	10,62	426,49	61,49	4,76	12,31
	T4	23,30	11,44	433,54	70,29	4,85	11,39
	Pvalor	NS	NS	NS	NS	NS	NS
2021	T1	18,69	9,40	468,31 a	47,97 b	5,42 a	13,14 ab
	T2	19,60	10,58	450,77 a	53,36 ab	5,40 a	12,36 b
	T3	17,79	9,27	418,48 b	46,39 b	5,15 b	14,32 a
	T4	20,53	11,54	418,31 b	58,26 a	5,21 b	13,05 ab
	Pvalor	NS	NS	**	*	***	*

Las diferencias entre medias se compararon usando el test de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD). Los niveles de significación se expresaron como * P <0,05, ** P <0,01, *** P <0,001, y NS (no significativo), P > 0,05. Los valores con distintas letras indican diferencias significativas. Los tratamientos aplicados fueron: control sin ninguna aplicación (T1), biosolarización con pellet de brassicas (T2), biosolarización con pellet de gallinaza (T3) y desinfección química con Basamid (T4).

Los tratamientos aplicados mostraron diferencias significativas en varias características de los turiones de espárrago. En términos de peso unitario, para los tres ciclos estudiados el tratamiento T2 de biofumigación con pellets de semillas de *B. carinata* fue el que presentó el mayor peso unitario promedio de turiones, seguido de cerca por el tratamiento T4 de desinfección química con Dazomet. Estas diferencias incluso fueron significativas respecto al control sin tratar (T1) en el primer ciclo (Tabla 51).

En cuanto al diámetro intermedio de los turiones, el tratamiento T2 de biofumigación también mostró un mejor desempeño en las tres campañas cosechadas. Los tratamientos T3 de biofumigación con pellets de estiércol de gallinaza y T4 de desinfección química también tuvieron diámetros intermedios que incluso fueron significativamente mayores que el control sin tratar (T1) en el ciclo 2019 (Tabla 51). Estos resultados sugieren que tanto la biofumigación como la desinfección química pueden promover el crecimiento y la expansión de los turiones de espárrago.

En términos de dureza de los turiones, parámetro desfavorable para la calidad de los mismos, el tratamiento T1 mostró el mayor valor promedio, superando a los demás tratamientos, aunque estas diferencias no fueron significativas en ninguno de los dos ciclos evaluados (Tabla 51).

El tratamiento T4 mostró valores significativamente más altos de °Brix en el primer ciclo de cultivo, lo que indica un mayor contenido de azúcares en las plantas de espárrago. En el segundo ciclo la significación desaparece e incluso en 2021 los tratamientos T1 y T2 presentan valores medios más altos, aunque no de forma significativa (Tabla 51). No parece, por tanto, que se genere ningún efecto destacable por la aplicación de los tratamientos sobre este parámetro tan importante para la calidad organoléptica de los espárragos. En el último ciclo de estudio, se observó que las plantas sometidas al tratamiento T3 alcanzaron valores de jugosidad media de los turiones mayores al resto de tratamientos que incluso fueron significativamente superiores a los valores del T2 (Tabla 51). Este resultado indica que la aplicación de pellets de estiércol de gallinaza puede contribuir positivamente a la retención de agua en los tejidos de las plantas, lo

que se traduce en una mayor jugosidad. Esta característica es importante, ya que este parámetro es un atributo sensorial clave en la calidad de los espárragos, y está asociado con su frescura y textura agradable al paladar.

En definitiva, los resultados obtenidos indican que tanto la biofumigación con pellets de semillas de *Brassica carinata* (T2) como la desinfección química con Dazomet (T4) pueden ser estrategias efectivas para mejorar el peso y el diámetro de los turiones de espárrago y para reducir la dureza de los mismos. Estos tratamientos superaron significativamente al control sin tratar (T1) en varias características de los turiones a lo largo del tiempo, lo que demuestra que las prácticas de control de los factores bióticos implicados en el síndrome de decaimiento en las plantaciones de espárrago, también pueden mejorar la calidad de la producción de turiones.

DISCUSIÓN GENERAL

1. Caracterización de las explotaciones de espárragos en España

La caracterización de las explotaciones de cultivo de espárrago en la zona estudiada ha revelado aspectos importantes sobre su distribución geográfica y las prácticas culturales aplicadas. Se ha observado que el cultivo de espárrago está ampliamente extendido en la región, con la vega de Granada-Loja destacándose como la zona más representativa en términos de superficie agrícola dedicada a este cultivo.

En cuanto a las características de las parcelas, se ha identificado que la mayoría de las tierras utilizadas para el cultivo de espárrago son arrendadas, lo que sugiere un modelo de propiedad que puede influir en las decisiones de manejo y dedicación de recursos. Además, se ha constatado que los suelos predominantes son de tipo pesado, con pendiente nula, y presentan bajos niveles de materia orgánica, lo que puede tener implicaciones en la capacidad de retención de agua y nutrientes.

Los cultivos previos al cultivo de espárrago fueron mayoritariamente cereales, lo que indica la existencia de una rotación de cultivos en las parcelas estudiadas. Esta práctica es relevante para el manejo sostenible del suelo y puede influir en la disponibilidad de nutrientes y la presencia de posibles patógenos del espárrago.

Sin embargo, una de las principales conclusiones de la caracterización es que se ha evidenciado un manejo inadecuado en las explotaciones de espárrago en la zona estudiada. Se ha encontrado que el riego no se ajusta adecuadamente a las necesidades del cultivo, lo que puede llevar a problemas de

encharcamiento o estrés hídrico. Además, la falta de desinfección del suelo y el agua puede favorecer el desarrollo de enfermedades fúngicas, como el síndrome del decaimiento, lo que representa un riesgo significativo para la producción y calidad del cultivo.

La baja adopción de prácticas ecológicas y la carencia de asesoramiento técnico adecuado para los agricultores son aspectos preocupantes, ya que limitan la implementación de estrategias más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Estos hallazgos indican la necesidad de mejorar el manejo de las explotaciones de espárrago en la zona estudiada, enfocándose en prácticas más adecuadas de riego y desinfección del suelo y agua, así como en promover la adopción de prácticas ecológicas y brindar asesoramiento técnico para apoyar a los productores del sector. De esta manera, se podría lograr un cultivo de espárrago más sostenible y saludable, reduciendo los riesgos asociados al síndrome de decaimiento y mejorando la productividad y calidad del cultivo.

2. Identificación de los factores abióticos implicados en el SDE

En este ensayo, se ha investigado en profundidad el impacto de diferentes tratamientos de suelo en el desarrollo del cultivo de espárrago, con un enfoque en el Síndrome del decaimiento del espárrago (SDE). Los tratamientos analizados fueron T1 (suelo sin cultivo previo de espárrago), T2 (suelo con cultivo previo de espárrago con síntomas de decaimiento y desinfectado) y T3 (suelo con cultivo previo de espárrago con síntomas de decaimiento sin desinfectar), y el estudio abarcó tres ciclos de cultivo en los años 2018, 2019 y 2020.

En el primer año (2018), se observó que los tratamientos no presentaron diferencias significativas en los parámetros de crecimiento estudiados. Sin embargo, se notaron ligeras tendencias, como una mayor altura y fitovolumen en el tratamiento T3 y un mayor número de tallos en el tratamiento T1. Estos hallazgos sugieren que la desinfección del suelo en el T2 podría no haber tenido un efecto beneficioso inmediato, posiblemente debido a la eliminación de microorganismos beneficiosos en el suelo. Factores abióticos también podrían estar influyendo en el desarrollo vegetativo. En el segundo año (2019), se observó una tendencia de pérdida de desarrollo en los tratamientos T2 y T3, especialmente en T2, aunque no se encontraron diferencias significativas en altura y fitovolumen. Sin embargo, el índice de área foliar (LAI) fue significativamente mayor en el tratamiento T1. Estos resultados apuntan a que la desinfección química en T2 pudo haber tenido un impacto negativo en el desarrollo y rendimiento del cultivo. En el tercer año (2020), las diferencias significativas entre los tratamientos se mantuvieron e incluso afectaron al número de tallos, que se redujo significativamente en T2. Esto respalda la idea de que factores abióticos podrían estar involucrados en el síndrome del decaimiento del espárrago, y que la desinfección del suelo no logró mejorar el cultivo, sino que, al contrario, afectó negativamente su desarrollo y rendimiento. La supervivencia de las plantas a lo largo de los ciclos de cultivo también fue evaluada, y el tratamiento T1 presentó una mayor supervivencia en comparación con T2 y T3, coincidiendo con los resultados de desarrollo y rendimiento. Esto sugiere que el T1 fue el tratamiento más favorable en términos de supervivencia y desarrollo del cultivo.

Los análisis fisiológicos, que incluyeron el análisis de pigmentos y hormonas vegetales, también revelaron diferencias entre los tratamientos. Aunque no se encontraron diferencias significativas en los niveles de pigmentos, los análisis hormonales señalaron que los tratamientos T2 y T3 mostraron una mayor formación de ROS en la parte aérea, indicando un mayor estrés oxidativo. Por otro lado, el T1 presentó una mejor protección antioxidante. Esto sugiere que la presencia de patógenos en el suelo pudo haber activado defensas en las plantas, llevando a una mayor producción de fenoles como estrategia de protección contra los patógenos. Sin embargo, una acumulación excesiva de fenoles puede tener efectos negativos en las plantas, especialmente si no hay suficientes microorganismos benéficos para descomponer y reciclar estos compuestos, lo que podría haber contribuido a la toxicidad y mortalidad de las plantas en T3. De hecho, los tratamientos T2 y T3 mostraron niveles significativamente más altos de compuestos derivados del ácido ferúlico en el segundo año, y el tratamiento T3 también presentó niveles más altos en el primer año en comparación con T1 y T2. Estos resultados sugieren que el SDE puede estar influido en la presencia de compuestos fenólicos en el suelo. Investigaciones anteriores han demostrado que los compuestos derivados del ácido ferúlico pueden tener potencial alelopático.

El análisis detallado de los niveles de nutrientes en el cultivo de espárrago mostró que los tratamientos de suelo tienen un impacto significativo en la concentración de nutrientes tanto en la parte aérea como en las raíces de las plantas. El tratamiento T2, con desinfección del suelo, mostró valores más altos de fósforo (P) en las partes aéreas y en las raíces, lo que sugiere una mayor disponibilidad y absorción de este nutriente en el suelo tratado con Dazomet. Por

otro lado, el T1, correspondiente al suelo no tratado, presentó mayores concentraciones de Ca y Mg en la parte aérea y una mayor concentración de Cu en las raíces.

Los resultados del análisis de cosecha y calidad del espárrago sugieren que el suelo no cultivado previamente con espárrago (T1) mostró el rendimiento comercial más alto y una mejor calidad del cultivo. Por otro lado, los tratamientos T2 y T3, que implicaban la desinfección del suelo, presentaron rendimientos comerciales más bajos y una mayor incidencia de espárragos no comerciales. La diferencia en el rendimiento entre los tratamientos puede estar relacionada con la presencia o ausencia de microbiota antagonista en el suelo. La desinfección del suelo en T2 pudo haber eliminado microorganismos beneficiosos y desequilibrado la comunidad microbiana, lo que resultó en un menor rendimiento y un mayor impacto del síndrome en las plantas de espárrago. En cuanto a la calidad, el tratamiento T3 mostró mejoras en dureza y contenido de azúcares, posiblemente debido a la activación de defensas en las plantas por la presencia de patógenos. El T1 se asoció con mayor jugosidad, mientras que el T2 mostró un impacto negativo en el tamaño de los turiones, lo que podría deberse a la acumulación de compuestos tóxicos en el suelo desinfectado. Estos resultados destacan la importancia de mantener una comunidad microbiana saludable para promover un mejor desarrollo y rendimiento del cultivo de espárrago.

3. Determinación de la eficacia de diferentes estrategias de control

Este estudio investigó diversas estrategias de control para abordar los factores bióticos que afectan el síndrome de decaimiento en las plantaciones de espárragos. Se evaluaron cuatro tratamientos: desinfección química con Dazomet (T4), biosolarización con pellets de *B. Carinata* (T2), biosolarización con pellets de gallinaza (T3) y un tratamiento control sin aplicación (T1). Los resultados indicaron que tanto los tratamientos de desinfección química como la biosolarización tuvieron efectos positivos en el crecimiento y desarrollo de las plantas de espárrago durante el período vegetativo.

En particular, el tratamiento T4 mostró una mayor altura de las plantas y un mayor fitovolumen en comparación con los otros tratamientos en el primer y segundo año de estudio. Además, todos los tratamientos de desinfección, incluido el T4, mostraron un efecto positivo en el número de tallos en el tercer año en comparación con el tratamiento control T1. Sin embargo, es importante mencionar que el tratamiento T4 también presentó aspectos negativos. En el segundo año, se observó una mayor producción de MDA, indicando un posible estrés oxidativo causado por el Dazomet.

En cuanto a las hormonas, no se encontraron diferencias significativas en la mayoría de las hormonas evaluadas en la parte aérea de las plantas en los dos años de estudio. Sin embargo, el tratamiento T3 resultó en mayores niveles de GA4, una hormona asociada con el crecimiento y elongación celular, lo que sugiere que este tratamiento podría tener un impacto positivo en el desarrollo de la planta. En términos de enzimas antioxidantes, el tratamiento T4 mostró una mayor actividad de SOD en la parte aérea, indicando una respuesta antioxidante

más pronunciada. Sin embargo, los tratamientos T3 y T4 estimularon una mayor actividad de APX en la raíz y parte aéreas, lo que indica una mayor capacidad de las plantas para neutralizar el H₂O₂. Además, estos tratamientos promovieron una mayor acumulación de AsA en las plantas, indicando una mayor capacidad antioxidante.

En cuanto al metabolismo de fenoles, los tratamientos T2 y T4 mostraron una mayor acumulación de fenoles totales tanto en las raíces como en la parte aérea de las plantas de espárrago. Estos compuestos fenólicos están asociados con la respuesta antioxidante y la defensa de las plantas frente a estrés abiótico y biótico. La estimulación de la síntesis y acumulación de compuestos fenólicos en las plantas de espárrago por parte de los tratamientos T2 y T4 podría contribuir a una mayor resistencia frente al síndrome de decaimiento y mejorar la calidad del cultivo.

Por otro lado, el tratamiento T2, que consistía en la biofumigación con pellets de semillas de *B. carinata*, mostró resultados positivos en la síntesis y acumulación de pigmentos y carotenoides, así como una menor producción de MDA y una mayor actividad de PPO, indicando una mayor resistencia y respuesta defensiva. El análisis de la cosecha y calidad de los turiones de espárrago reveló que el tratamiento T2 tuvo un rendimiento comercial significativamente mayor y una mejor calidad en comparación con los demás tratamientos. Por otro lado, el tratamiento T4 mostró aspectos negativos en la calidad de los turiones, lo que podría afectar su comercialización y valor en el mercado. En general, los resultados destacan la eficacia de la biosolarización con pellets de *Brassica carinata* como una estrategia prometedora para mejorar la producción y calidad de los turiones de espárrago, mientras que la

desinfección química con Dazomet podría requerir una reconsideración debido a los aspectos negativos observados.

CONCLUSIONES / CONCLUSIONS

1. El cultivo de espárrago se encuentra ampliamente distribuido en la zona estudiada, con La vega de Granada- Loja como la zona más representativa. Se evidencia un manejo inadecuado en las explotaciones, con un riego poco ajustado a las necesidades del cultivo y la falta de desinfección del suelo y el agua. Estas prácticas podrían favorecer el desarrollo de enfermedades fúngicas y la acumulación de sustancias alelopáticas en el suelo, contribuyendo al síndrome del decaimiento. Además, destaca la escasa adopción de prácticas ecológicas y la falta de asesoramiento técnico adecuado para los agricultores. Estos hallazgos resaltan la necesidad de mejorar las prácticas de manejo y promover la capacitación técnica para lograr un cultivo de espárrago más sostenible y saludable.

2. En cuanto al efecto del SDE en la fisiología y metabolismo de la planta, se observó que la desinfección del suelo no tuvo efectos beneficiosos inmediatos y podría estar relacionada con una pérdida de desarrollo y rendimiento del cultivo en el largo plazo. Además, se evidenció que el SDE puede estar asociado con una mayor formación de ROS, lo que podría tener efectos tóxicos en las plantas. Estos hallazgos resaltan la importancia de comprender los mecanismos del SDE para implementar prácticas agrícolas más sostenibles y mitigar el riesgo de esta enfermedad en el cultivo de espárrago.

3. Los resultados de este estudio indican una posible relación entre los compuestos alelopáticos, especialmente el ácido ferúlico, y el desarrollo del SDE. La desinfección del suelo podría haber contribuido al SDE y afectado negativamente el rendimiento del cultivo debido a una comunidad microbiana desequilibrada. Además, se ha observado un impacto significativo en la concentración de nutrientes en las plantas, lo que podría influir en incidencia del

SDE. Por tanto, se destaca la importancia de prácticas de manejo que promuevan un equilibrio microbiano y eviten la acumulación de compuestos alelopáticos para prevenir o mitigar el SDE y mejorar la calidad y rendimiento del cultivo.

4. Tanto la desinfección química con Dazomet (T4) como la biosolarización con pellets de *Brassica carinata* (T2) mostraron efectos positivos en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Además, este último tratamiento mejoró significativamente el rendimiento y calidad de los turiones de espárrago. Por otro lado, el tratamiento T3 con biosolarización de pellets de gallinaza mostró limitaciones en su eficacia. En conclusión, la desinfección química y la biosolarización con *B. Carinata* son alternativas prometedoras, mientras que el tratamiento con pellets de gallinaza (T3) se podría descartar como estrategia de control para el SDE.

1. Asparagus cultivation is widely distributed in the studied area, with the Vega de Granada-Loja region being the most representative. Evidence shows inadequate management practices in the farms, with irrigation not properly adjusted to the crop's needs and lack of soil and water disinfection. These practices could promote the development of fungal diseases and the accumulation of allelopathic substances in the soil, contributing to the ASD. Additionally, the limited adoption of ecological practices and the lack of proper technical advice for farmers are noteworthy. These findings emphasize the need to improve management practices and promote technical training to achieve a more sustainable and healthy asparagus cultivation.

2. Regarding the effect of ASD on the physiology and metabolism of the plant, it was observed that soil disinfection did not have immediate beneficial effects and may be related to long-term crop loss of development and yield. Furthermore, evidence showed that ASD might be associated with an increased formation of ROS, which could have toxic effects on plants. These findings highlight the importance of understanding the mechanisms of ASD to implement more sustainable agricultural practices and mitigate the risk of this disease in asparagus cultivation.

3. The results of this study indicate a possible relationship between allelopathic compounds, especially ferulic acid, and the development of ASD. Soil disinfection could have contributed to ASD and negatively affected crop yield due to an imbalanced microbial community. Additionally, a significant impact on nutrient concentration in plants has been observed, which could influence the incidence of ASD. Therefore, the importance of management practices that promote microbial balance and prevent the accumulation of allelopathic

compounds to prevent or mitigate ASD and improve crop quality and yield is emphasized.

4. Both chemical disinfection with Dazomet (T4) and biosolarization with *B. carinata* pellets (T2) showed positive effects on plant growth and development. Moreover, the latter treatment significantly improved the yield and quality of asparagus spears. On the other hand, the treatment with biosolarization of chicken manure pellets showed limitations in its effectiveness. In conclusion, chemical disinfection and biosolarization with *B. carinata* are promising alternatives, while the treatment with chicken manure pellets (T3) may be discarded as a control strategy for ASD.

BIBLIOGRAFÍA

Ahanger, M. A., Tomar, N. S., Tittal, M., Argal, S. & Agarwal, R. M. (2017). Plant growth under water/salt stress: ROS production; antioxidants and significance of added potassium under such conditions. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 23(4), 731–744. <https://doi.org/10.1007/s12298-017-0462-7>

Ahmad, P., Jaleel, C. A., Salem, M. A., Nabi, G. & Sharma, S. (2010). Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. *Critical Reviews in Biotechnology*, 30(3), 161–175. <https://doi.org/10.3109/07388550903524243>

Amjad, M., Akhtar, J., Anwar-ul-Haq, M., Yang, A., Akhtar, S. S. & Jacobsen, S.-E. (2014). Integrating role of ethylene and ABA in tomato plants adaptation to salt stress. *Scientia Horticulturae*, 172, 109–116. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2014.03.024>

Asprelli, P. D., López Anido, F. S. & Cointry, E. L. (2005). Caracteres agronómicos en el cultivo de espárrago de diferentes edades y manejos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40(1), 47–52. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000100007>

Baayen, R. P. & Gams, W. (1988). The Elegans fusaria causing wilt disease of carnation. I. Taxonomy. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 94(6), 273–288. <https://doi.org/10.1007/BF01998052/METRICS>

Baayen, Robert P., O'Donnell, K., Bonants, P. J. M., Cigelnik, E., Kroon, L. P. N. M., Roebroeck, E. J. A. & Waalwijk, C. (2007). Gene Genealogies and AFLP Analyses in the *Fusarium oxysporum* Complex Identify Monophyletic and Nonmonophyletic Formae Speciales Causing Wilt and Rot

Disease. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2000.90.8.891>, 90(8), 891–900.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO.2000.90.8.891>

Baron, C. G. & Vallejo, H. (1990). Asparagus whitening using black polyethylene. *Asparagus Research Newsletter*, 8(1), 13–23.

Barrameda-Medina, Y., Montesinos-Pereira, D., Romero, L., Blasco, B. & Ruiz, J. M. (2014). Role of GSH homeostasis under Zn toxicity in plants with different Zn tolerance. *Plant Science*, 227, 110–121.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.07.010>

Bashri, G. & Prasad, S. M. (2016). Exogenous IAA differentially affects growth, oxidative stress and antioxidants system in Cd stressed *Trigonella foenum-graecum* L. seedlings: Toxicity alleviation by up-regulation of ascorbate-glutathione cycle. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 132, 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.06.015>

Becker, E. M., Nissen, L. R. & Skibsted, L. H. (2004). Antioxidant evaluation protocols: Food quality or health effects. *European Food Research and Technology*, 219(6), 561–571.
<https://doi.org/10.1007/s00217-004-1012-4>

Beltagi, E. & Zhang, S. (2023). Recent Advances of Polyphenol Oxidases in Plants. *Molecules* 2023, Vol. 28, Page 2158, 28(5), 2158.
<https://doi.org/10.3390/MOLECULES28052158>

Blaacutierrez, M. A., Nelson, D. C. & Weijers, D. (2020). Evolution of Plant Hormone Response Pathways. *Annual Review of Plant Biology*, 71, 327–353. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ARPLANT-050718-100309>

Blok, W. J. & Bollen, G. J. (1993). The role of autotoxins from root residues of the previous crop in the replant disease of asparagus. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 99(3 Supplement), 29–40.
<https://doi.org/10.1007/BF03041393>

Blok, Wim J. & Bollen, G. J. (1996). Etiology of asparagus replant-bound early decline. *European Journal of Plant Pathology*, 102(1), 87–98.
<https://doi.org/10.1007/BF01877119>

Booth, Colin. (1971). The genus *Fusarium*. Kew, UK, Commonwealth Mycological Institute, 237.

Bowler, C., Montagu, M. V & Inze, D. (1992). Superoxide Dismutase and Stress Tolerance. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 43(1), 83–116.
<https://doi.org/10.1146/annurev.pp.43.060192.000503>

Brizuela, A. M., Lastra, E. D. la, Marín-Guirao, J. I., Gálvez, L., Cara-García, M. de, Capote, N. & Palmero, D. (2020). *Fusarium* consortium populations associated with asparagus crop in Spain and their role on field decline syndrome. *Journal of Fungi*, 6(4), 1–23.
<https://doi.org/10.3390/JOF6040336>

Burri, S. C. M., Ekholm, A., Håkansson, Å., Tornberg, E. & Rumpunen, K. (2017). Antioxidant capacity and major phenol compounds of horticultural plant materials not usually used. *Journal of Functional Foods*, 38, 119–127.
<https://doi.org/10.1016/J.JFF.2017.09.003>

Carmona-Martín, E., Regalado, J. J., Padilla, I. M. G., Westendorp, N. & Encina, C. L. (2014). A new and efficient micropropagation method and its

breeding applications in *Asparagus* genera. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 119(3), 479–488. <https://doi.org/10.1007/S11240-014-0548-7/FIGURES/3>

Castagnino, A. (2009). Manual de cultivos hortícolas innovadores. *Universidad Científica Del Sur, Argentina*, 365.

Castagnino, A. M., Sastre, P., Menet, A. & Rosini, M. B. (2006). Influencia del tamaño de arañas en la producción comercial de espárrago verde. *Cultivos Tropicales*, 27(4), 53–59. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215912009>

Castillo-Díaz, F. J., Belmonte-Ureña, L. J., Camacho-Ferre, F. & Marquina, J. C. T. (2022). Biodisinfection as a Profitable Fertilization Method for Horticultural Crops in the Framework of the Circular Economy. *Agronomy* 2022, Vol. 12, Page 521, 12(2), 521. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12020521>

Castro, P., Die, J. V, Jacobi, J., Budahn, H., Nothnagel, T. & König, J. (2023). Studies on the Identification of Resistance to *Fusarium oxysporum* (Schlecht.) in Different Genetic Backgrounds of *Asparagus officinalis* (L.) and Its Defense Responses. *Horticulturae* 2023, Vol. 9, Page 158, 9(2), 158. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE9020158>

Chase, M. W., Reveal, J. L. & Fay, M. F. (2009). A subfamilial classification for the expanded asparagalean families Amaryllidaceae, Asparagaceae and Xanthorrhoeaceae. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(2), 132–136. <https://doi.org/10.1111/J.1095-8339.2009.00999.X>

Cheyrier, V., Comte, G., Davies, K. M., Lattanzio, V. & Martens, S. (2013). Plant phenolics: Recent advances on their biosynthesis, genetics, and ecophysiology. *Plant Physiology and Biochemistry*, 72, 1–20. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2013.05.009>

Chtioui, W., Balmas, V., Delogu, G., Migheli, Q. & Oufensou, S. (2022). Bioprospecting Phenols as Inhibitors of Trichothecene-Producing *Fusarium*: Sustainable Approaches to the Management of Wheat Pathogens. *Toxins* 2022, Vol. 14, Page 72, 14(2), 72. <https://doi.org/10.3390/TOXINS14020072>

Corpas-Hervias, C., Melero-Vara, J. M., Molinero-Ruiz, M. L., Zurera-Muñoz, C. & Basallote-Ureba, M. J. (2007). Characterization of Isolates of *Fusarium* spp. Obtained from Asparagus in Spain. <https://doi.org/10.1094/PD-90-1441>, 90(11), 1441–1451. <https://doi.org/10.1094/PD-90-1441>

Cuypers, A., Vangronsveld, J. & Clijsters, H. (2001). The redox status of plant cells (AsA and GSH) is sensitive to zinc imposed oxidative stress in roots and primary leaves of *Phaseolus vulgaris*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 39(7–8), 657–664. [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(01\)01276-1](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(01)01276-1)

de la Lastra, E., Camacho, M. & Capote, N. (2021). Soil bacteria as potential biological control agents of *Fusarium* species associated with asparagus decline syndrome. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(18), 8356. <https://doi.org/10.3390/APP11188356/S1>

de la Lastra, E., Marín-Guirao, J. I., López-Moreno, F. J., Soriano, T., de Cara-García, M. & Capote, N. (2021). Potential inoculum sources of

Fusarium species involved in asparagus decline syndrome and evaluation of soil disinfestation methods by qPCR protocols. *Pest Management Science*, 77(10), 4749–4757. <https://doi.org/10.1002/PS.6519>

Dean, B. B. (1999). The effect of temperature on Asparagus spear growth and correlation of heat units accumulated in the field with spear yield. *Acta Horticulturae*, 479, 289–295. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.1999.479.40>

Dietz, K.-J. (2016). Thiol-Based Peroxidases and Ascorbate Peroxidases: Why Plants Rely on Multiple Peroxidase Systems in the Photosynthesizing Chloroplast? *Molecules and Cells*, 39(1), 20–25. <https://doi.org/10.14348/molcells.2016.2324>

Djalali Farahani-Kofoet, R., Häfner, F. & Feller, C. (2023). Effect of Organic and Mineral Soil Additives on Asparagus Growth and Productivity in Replant Soils. *Agronomy*, 13(6), 1464. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13061464/S1>

dos Santos, C. A., Abboud, A. C. de S. & Do Carmo, M. G. F. (2021). Biofumigation with species of the brassicaceae family: A review. In *Ciencia Rural* (Vol. 51, Issue 1, pp. 1–17). Universidade Federal de Santa Maria. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr2020040>

Drost, D. (2023). Asparagus breeding: Future research needs for sustainable production. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1148312. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1148312/BIBTEX>

Drost, D. T. (2020). Asparagus. *The Physiology of Vegetable Crops*, 457–479. <https://doi.org/10.1079/9781786393777.0457>

El-Gengaihi, S., Ella, F. M. A., Emad, M. H., Shalaby, E. & Doha, H. (2014). Antioxidant activity of phenolic compounds from different grape wastes. *Journal of Food Processing and Technology*, 5(2). <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20143200314>

Ellison, J. H. & Kinelski, J. J. (1986). 'Greenwich', a Male Asparagus Hybrid. *HortScience*, 21(5), 1249–1249. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.21.5.1249>

Elmer, W. (2018). Asparagus decline and replant problem: A look back and a look forward at strategies for mitigating losses. *Acta Horticulturae*, 1223, 195–204. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2018.1223.27>

Elmer, W. (2015). Management of *Fusarium* crown and root rot of asparagus. *Crop Protection*, 73, 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.12.005>

Elmer, W. & Pignatello, J. J. (2011). Effect of biochar amendments on mycorrhizal associations and *Fusarium* crown and root rot of asparagus in replant soils. *Plant Disease*, 95(8), 960–966. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-10-0741>

Elmer, W. (2001). *Fusarium* diseases of asparagus. In Summerell B.A., Leslie J.F., Backhouse D., Bryden W.L. & Burgess L. W. (Eds.), *Fusarium. Paul E. Nelson Memorial Symposium* (pp. 248–262). American Phytopathological Society Press.

Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos (ESYRCE). *Encuesta de Marco de Áreas de España.* (n.d.). Retrieved January 24, 2023,

from <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/default.aspx>

Etesami, H., Ryong Jeong, B. & Rizwan, M. (2020). The use of silicon in stressed agriculture management: Action mechanisms and future prospects. *Metalloids in Plants: Advances and Future Prospects*, 381–431. <https://doi.org/10.1002/9781119487210.ch19>

Eugui, D., Escobar, C., Velasco, P. & Poveda, J. (2022). Glucosinolates as an effective tool in plant-parasitic nematodes control: Exploiting natural plant defenses. *Applied Soil Ecology*, 176, 104497. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2022.104497>

FAO. (2001). *Políticas y programas de semillas en América Latina y en Caribe : Actas de la Reunión Técnica regional sobre políticas y programas de semillas en América Latina y el Caribe.*

Fei, Y., Zhenming, Y. & Limei, H. (2000). Review on research methods for allelopathy and allelochemicals in plants. *Acta Ecologica Sinica*, 20(4), 692–696. <https://europepmc.org/article/cba/338464>

Fravel, D., Olivain, C. & Alabouvette, C. (2003). *Fusarium oxysporum* and its biocontrol. *New Phytologist*, 157(3), 493–502. <https://doi.org/10.1046/J.1469-8137.2003.00700.X>

García, V., Gil, J. & Moreno, R. (2022). *Desarrollo de poblaciones base de mejora y de un mapa genético en espárrago (Asparagus officinalis L.).* <http://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/23200>

Gavahian, M., Yang, Y. H. & Tsai, P. J. (2022). Power ultrasound for valorization of Citrus limon (cv. Eureka) waste: Effects of maturity stage and drying method on bioactive compounds, antioxidant, and anti-diabetic activity. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 79, 103052. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2022.103052>

GERLACH, W. & NIRENBERGH. (1982). THE GENUS FUSARIUM - APICTORIAL ATLAS. *THE GENUS FUSARIUM - APICTORIAL ATLAS*.

Goyal, R., Singh, J. & Lal, H. (2003). Asparagus racemosus--an update. *Indian Journal of Medical Sciences*, 57(9), NA-NA. <https://go.gale.com/ps/i.do?p=HRCA&sw=w&issn=00195359&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA110962454&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext>

Hanschen, F. S. & Winkelmann, T. (2020). Biofumigation for Fighting Replant Disease- A Review. *Agronomy*, 10(3), 425. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030425>

Hartung, A. C. & Stephens, C. T. (1983). Effects of allelopathic substances produced by asparagus on incidence and severity of asparagus decline due to Fusarium crown rot. *Journal of Chemical Ecology* 1983 9:8, 9(8), 1163–1174. <https://doi.org/10.1007/BF00982219>

<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. (2022). FAO Global Statistical Yearbook, FAO Regional Statistical Yearbooks.

Huang, B., Chen, Y., Pei, Z., Jiang, L., Zhang, Y., Wang, J. & Wang, J. (2023). Application of microbial organic fertilizers promotes the utilization of nutrients and restoration of microbial community structure and function in

rhizosphere soils after dazomet fumigation. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1122611. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2022.1122611/BIBTEX>

Imtiaz, H., Mir, A. R., Corpas, F. J. & Hayat, S. (2022). Impact of potassium starvation on the uptake, transportation, photosynthesis, and abiotic stress tolerance. *Plant Growth Regulation* 2022 99:3, 99(3), 429–448. <https://doi.org/10.1007/S10725-022-00925-7>

Iqbal, M., Bibi, Y., Iqbal Raja, N., Ejaz, M., Hussain, M., Yasmeen, F., Saira, H. & Imran, M. (2017). Review on Therapeutic and Pharmaceutically Important Medicinal Plant *Asparagus officinalis* L. *Journal of Plant Biochemistry & Physiology*, 05(01). <https://doi.org/10.4172/2329-9029.1000180>

Iqbal, N., Trivellini, A., Masood, A., Ferrante, A. & Khan, N. A. (2013). Current understanding on ethylene signaling in plants: the influence of nutrient availability. *Plant Physiology and Biochemistry*, 73, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.09.011>

Ishikawa, T. & Shigeoka, S. (2008). Recent advances in ascorbate biosynthesis and the physiological significance of ascorbate peroxidase in photosynthesizing organisms. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 72(5), 1143–1154. <https://doi.org/10.1271/BBB.80062>

Jacobi, J., Budahn, H., Nothnagel, T. & König, J. (2023). Studies on the Identification of Resistance to *Fusarium oxysporum* (Schlecht.) in Different Genetic Backgrounds of *Asparagus officinalis* L. and Its Defense Responses. *Horticulturae*, 9(2), 158. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE9020158/S1>

Jaiswal, S., Tripathi, D. K., Gupta, R., Corpas, F. J. & Singh, V. P. (2023). HPCA1: a H₂O₂ Sensor Mediating Biotic and Abiotic Stress Resilience in Plants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1–4. <https://doi.org/10.1007/S00344-023-11055-3/FIGURES/1>

Jiang, S., Hu, C., Pang, Y., Yuan, S., Liang, J., Zhang, J. & Zhang, J. (2023). *Multiple-function eco-friendly bacterial with high efficiency and widely environmental adaptability on phenol degradation*. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-2606938/V1>

Jiménez-Sánchez, C., Pedregosa, F., Borrás-Linares, I., Lozano-Sánchez, J. & Segura-Carretero, A. (2021). Identification of Bioactive Compounds of *Asparagus officinalis* L.: Permutation Test Allows Differentiation among “Triguero” and Hybrid Green Varieties. *Molecules* 2021, Vol. 26, Page 1640, 26(6), 1640. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26061640>

Kasote, D. M., Lee, J. H. J., Jayaprakasha, G. K. & Patil, B. S. (2019). Seed Priming with Iron Oxide Nanoparticles Modulate Antioxidant Potential and Defense-Linked Hormones in Watermelon Seedlings. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(5), 5142–5151. https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.8B06013/ASSET/IMAGES/LARGE/SC-2018-06013C_0007.JPEG

Kathe, L., Krämer, R., Budahn, H., Pillen, K., Rabenstein, F. & Nothnagel, T. (2019). Development of a bioassay to assess resistance to *Fusarium oxysporum* (Schlecht.) in asparagus (*Asparagus officinalis* L.).

Journal of Phytopathology, 167(10), 558–566.
<https://doi.org/10.1111/JPH.12845>

Kato-Noguchi, H., Nakamura, K., Ohno, O., Suenaga, K. & Okuda, N. (2017). Asparagus decline: Autotoxicity and autotoxic compounds in asparagus rhizomes. *Journal of Plant Physiology*, 213, 23–29.
<https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2017.02.011>

Kato-Noguchi, H., Nakamura, K. & Okuda, N. (2018). Involvement of an autotoxic compound in asparagus decline. *Journal of Plant Physiology*, 224–225, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.03.005>

Kirschenbilder, E. (2014). *Estudio del efecto del empleo de invernaderos sobre la productividad de cuatro genotipos de espárrago verde: Marte, H668, Giove y UC-157 en su quinta cosecha y el comportamiento en poscosecha de turiones largos.*
<https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/331>

Lake, R. J., Falloon, P. G. & Cook, D. W. M. (1993). Replant problem and chemical components of asparagus roots. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 21(1), 53–58.
<https://doi.org/10.1080/01140671.1993.9513746>

Lambers, H. (2022). Phosphorus Acquisition and Utilization in Plants. *Annual Review of Plant Biology*, 73, 17–42.
<https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ARPLANT-102720-125738>

Lecourieux, D., Ranjeva, R. & Pugin, A. (2006). Calcium in plant defence-signalling pathways. *New Phytologist*, 171(2), 249–269.
<https://doi.org/10.1111/J.1469-8137.2006.01777.X>

Leslie, J. F., Zeller, K. A. & Summerell, B. A. (2001). Icebergs and species in populations of *Fusarium*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 59(3), 107–117. <https://doi.org/10.1006/PMPP.2001.0351>

Levin, G., Yasmin, M., Liveanu, V., Burstein, C., Hanna, R., Kleifeld, O., Simanowitz, M. C., Meir, A., Tadmor, Y., Hirschberg, J., Adir, N. & Schuster, G. (2023). A desert *Chlorella* sp. that thrives at extreme high-light intensities using a unique photoinhibition protection mechanism. *The Plant Journal*, 115(2), 510–528. <https://doi.org/10.1111/TPJ.16241>

Li, Y. P., Feng, Y. L., Kang, Z. L., Zheng, Y. L., Zhang, J. L. & Chen, Y. J. (2017). Changes in soil microbial communities due to biological invasions can reduce allelopathic effects. *Journal of Applied Ecology*, 54(5), 1281–1290. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12878>

Liu, Y., Wang, W., Shah, S. B., Zanaroli, G., Xu, P. & Tang, H. (2020). Phenol biodegradation by *Acinetobacter radioresistens* APH1 and its application in soil bioremediation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(1), 427–437. <https://doi.org/10.1007/S00253-019-10271-W/TABLES/2>

Marnett, L. J. (1999). Lipid peroxidation - DNA damage by malondialdehyde. *Mutation Research - Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 424(1–2), 83–95. [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(99\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(99)00010-X)

Maskova, L., Simmons, R. W., Deeks, L. K., de Baets, S. & Drost, D. T. (2023). Impacts of Long-Term Application of Best Management Practices on Yields and Root Carbohydrate Content in Asparagus (*Asparagus Officinalis*) (UK). *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.4349478>

Miller, H. G., Ikawa, M. & Peirce, L. C. (1991). Caffeic Acid Identified as an Inhibitory Compound in Asparagus Root Filtrate. *HortScience*, 26(12), 1525–1527. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.26.12.1525>

Mishra, S., Upadhyay, R. S. & Nautiyal, C. S. (2013). Unravelling the beneficial role of microbial contributors in reducing the allelopathic effects of weeds. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(13), 5659–5668. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-4885-y>

Misra, D., Dutta, W., Jha, G. & Ray, P. (2023). Interactions and Regulatory Functions of Phenolics in Soil-Plant-Climate Nexus. *Agronomy* 2023, Vol. 13, Page 280, 13(2), 280. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13020280>

Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. In *Trends in Plant Science* (Vol. 7, Issue 9, pp. 405–410). Elsevier Current Trends. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02312-9)

Moreno, R., Espejo, J. A., Cabrera, A. & Gil, J. (2008). Origin of tetraploid cultivated asparagus landraces inferred from nuclear ribosomal DNA internal transcribed spacers' polymorphisms. *Annals of Applied Biology*, 153(2), 233–241. <https://doi.org/10.1111/J.1744-7348.2008.00254.X>

Moreno-Pinel, R., Castro-López, P., Die-Ramón, J. & Gil-Ligero, J. (2021). Asparagus (*Asparagus officinalis* L.) Breeding. *Advances in Plant Breeding Strategies: Vegetable Crops*, 425–469. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66961-4_12

Mortarini, N. V. (2021). *Evaluación de la elongación, calidad y rendimiento de turiones de espárrago verde (Asparagus officinalis L.) producidos bajo*

dos sistemas de inicio, aranas y plantines, en Azul, Buenos Aires.
<https://repo.unlpam.edu.ar/handle/unlpam/7960>

Motoki, S., Ozawa, T., Komatsu, K., Tsukada, M., Hattori, T., Komura, T. & Oka, J. (2002). Allelopathy in asparagus 1: Reduction of the allelopathic effect on asparagus by the flowable agent in activated Carbon. *Acta Horticulturae*, 589, 381–386.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.589.54>

Mousavizadeh, S. J., Gil, J., Moreno, R. & Mashayekhi, K. (2022). Asparagus ploidy distribution related to climates adaptation in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 24(4), 5582–5593.
<https://doi.org/10.1007/S10668-021-01672-X/FIGURES/3>

Naikoo, M. I., Dar, M. I., Raghieb, F., Jaleel, H., Ahmad, B., Raina, A., Khan, F. A. & Naushin, F. (2019). Role and Regulation of Plants Phenolics in Abiotic Stress Tolerance: An Overview. *Plant Signaling Molecules: Role and Regulation under Stressful Environments*, 157–168.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816451-8.00009-5>

Navarro-León, E., Ruiz, J. M., Albacete, A. & Blasco, B. (2020). Tolerance to cadmium toxicity and phytoremediation potential of three *Brassica rapa* CAX1a TILLING mutants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109961>

Negi, J., Singh, P., Joshi, G., Rawat, M. & Bisht, V. (2010). Chemical constituents of Asparagus. *Pharmacognosy Reviews*, 4(8), 215.
<https://doi.org/10.4103/0973-7847.70921>

Nelson P.E., Toussoun T.A. & Marasas W.F.O. (1983). *Fusarium species: an illustrated manual for identification*. <https://doi.org/10.3/JQUERY-UI.JS>

Nile, S. H., Nile, A. S., Keum, Y. S. & Sharma, K. (2017). Utilization of quercetin and quercetin glycosides from onion (*Allium cepa* L.) solid waste as an antioxidant, urease and xanthine oxidase inhibitors. *Food Chemistry*, 235, 119–126. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2017.05.043>

Noperi-Mosqueda, L. C., López-Moreno, F. J., Navarro-León, E., Sánchez, E., Blasco, B., Moreno, D. A., Soriano, T. & Ruiz, J. M. (2020). Effects of asparagus decline on nutrients and phenolic compounds, spear quality, and allelopathy. *Scientia Horticulturae*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109029>

Nxele, X., Klein, A. & Ndimba, B. K. (2017). Drought and salinity stress alters ROS accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants. *South African Journal of Botany*, 108, 261–266. <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2016.11.003>

Observatorio de Precios y Mercados. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía. (n.d.). Retrieved March 17, 2023, from https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/observatorio/servlet/FrontController?action=Static&url=buscador.jsp&ec=default&search_param=esparrago

O'Donnell, K. & Gray, L. E. (1995). Phylogenetic relationships of the soybean sudden death syndrome pathogen *Fusarium solani* f. sp. *phaseoli* inferred from rDNA sequence data and PCR primers for its identification.

Molecular Plant-Microbe Interactions, 8(5), 709–716.
<https://doi.org/10.1094/MPMI-8-0709>

Ornstrup, O. (1997). Biotechnological methods in asparagus breeding. *Asparagus Research Newsletter*, 14, 1–25.

Ozaki, Y., Narikiyo, K., Fujita, C. & Okubo, H. (2004). Ploidy variation of progenies from intra- and inter-ploidy crosses with regard to trisomic production in asparagus (*Asparagus officinalis* L.). *Sexual Plant Reproduction*, 17(4), 157–164. <https://doi.org/10.1007/S00497-004-0229-5/TABLES/4>

Panth, M., Hassler, S. C. & Baysal-Gurel, F. (2020). Methods for Management of Soilborne Diseases in Crop Production. *Agriculture 2020*, Vol. 10, Page 16, 10(1), 16.
<https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE10010016>

Pinior, A., Grunewaldt-Stöcker, G., von Alten, H. & Strasser, R. J. (2005). Mycorrhizal impact on drought stress tolerance of rose plants probed by chlorophyll a fluorescence, proline content and visual scoring. *Mycorrhiza*, 15(8), 596–605. <https://doi.org/10.1007/s00572-005-0001-1>

Reuther, G. (1996). Somatic embryogenesis in asparagus suspension cultures. *Acta Horticulturae*, 415, 215–223.
<https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.1996.415.31>

Risso, A. A., Castagnino, A. M., Díaz, K. E., Rosini, M. B., Marina, J. A. & Falavigna, A. (2012). Productividad y calidad de cuatro híbridos de espárrago verde (*Asparagus officinalis* L. var. *altilis*) en invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(1), 55–66.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2011-21732012000100006&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Romero-Fierro, D., Bustamante-Torres, M., Hidalgo-Bonilla, S. & Bucio, E. (2021). *Microbial Degradation of Disinfectants*. 91–130. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0518-5_4

Saed-Moucheshi, A., Shekoofa, A. & Pessarakli, M. (2014). Reactive Oxygen Species (ROS) Generation and Detoxifying in Plants. *Journal of Plant Nutrition*, 37(10), 1573–1585. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.868483>

Schofield, P. E. (1991). Asparagus decline and replant problem in new zealand. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 19(3), 213–220. <https://doi.org/10.1080/01140671.1991.10421803>

Schreuder, W., Lamprecht, S. C., Marasas, W. F. O. & Calitz, F. J. (1995). Pathogenicity of three *Fusarium* species associated with asparagus decline in South Africa. *Plant Disease*, 79(2).

Serrano Cermeño, Zoilo. (2003). *Espárrago: técnicas de producción*. <https://www.casadellibro.com/libro-esparrago-tecnicas-de-produccion/9788460790624/952922>

Singh, A. & Roychoudhury, A. (2023). Hydrogen peroxide as a signaling molecule in plant abiotic stress. *Crop Sustainability and Intellectual Property Rights*, 237–264. <https://doi.org/10.1201/9781003383024-11/HYDROGEN-PEROXIDE-SIGNALING-MOLECULE-PLANT-ABIOTIC-STRESS-ANKUR-SINGH-ARYADEEP-ROYCHOUDHURY>

Sunada, K., Ding, X. G., Utami, M. S., Kawashima, Y., Miyama, Y. & Hashimoto, K. (2008). Detoxification of phytotoxic compounds by TiO₂ photocatalysis in a recycling hydroponic cultivation system of asparagus. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(12), 4819–4824. <https://doi.org/10.1021/jf8001075>

Szabo, K., Mitrea, L., Călinoiu, L. F., Teleky, B.-E., Martău, G. A., Plamada, D., Pascuta, M. S., Nemeş, S.-A., Varvara, R.-A. & Vodnar, D. C. (2022). Natural Polyphenol Recovery from Apple-, Cereal-, and Tomato-Processing By-Products and Related Health-Promoting Properties. *Molecules*, 27(22), 7977. <https://doi.org/10.3390/molecules27227977>

Tello J.C., Vares F. & Lacasa A. (1991). Análisis de muestras. *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.*, 37–72.

Tewari, R. K., Kumar, P., Neetu & Sharma, P. N. (2005). Signs of oxidative stress in the chlorotic leaves of iron starved plants. *Plant Science*, 169(6), 1037–1045. <https://doi.org/10.1016/J.PLANTSCI.2005.06.006>

Treutter, D. (2010). Managing Phenol Contents in Crop Plants by Phytochemical Farming and Breeding—Visions and Constraints. *International Journal of Molecular Sciences* 2010, Vol. 11, Pages 807-857, 11(3), 807–857. <https://doi.org/10.3390/IJMS11030807>

Vargas-Hernandez, M., Arriaga-Madrid, D. A., Cortez-Perez, A., Feregrino-Perez, A. A., Ortega-Salazar, M. G., Alpuche-Solis, A. G., Torres-Pacheco, I., Gautier, F. & Guevara-Gonzalez, R. G. (2023). White mustard (*Sinapis alba* L.) residues with enhanced potential as soil biofumigant by using controlled elicitation during cultivation. *European*

Journal of Plant Pathology, 166(2), 209–218.
<https://doi.org/10.1007/S10658-023-02655-6/TABLES/4>

Wang, J., Liu, Y., Zhao, J., Zhang, W. & Pang, X. (2013). Saponins extracted from by-product of *Asparagus officinalis* L. suppress tumour cell migration and invasion through targeting Rho GTPase signalling pathway. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(6), 1492–1498.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.5922>

Webber lii, C. L., White, P. M., Landrum, D. S., Spaunhorst, D. J., Wayment, D. G., Dorvil, E. & Webber, C. L. (2018). Sugarcane Field Residue and Root Allelopathic Impact on Weed Seed Germination. *Journal of Agricultural Science*, 10(1). <https://doi.org/10.5539/jas.v10n1p66>

Wong, J. Y. & Jeffries, P. (2006). Diversity of pathogenic *Fusarium* populations associated with asparagus roots in decline soils in Spain and the UK. *Plant Pathology*, 55(3), 331–342. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01360.x>

Wu, H. sheng, Luo, J., Raza, W., Liu, Y. xia, Gu, M., Chen, G., Hu, X. feng, Wang, J. heng, Mao, Z. sheng & Shen, Q. rong. (2010). Effect of exogenously added ferulic acid on in vitro *Fusarium oxysporum* f. sp. niveum. *Scientia Horticulturae*, 124(4), 448–453.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.02.007>

Xiao, M., Li, Z., Zhu, L., Wang, J., Zhang, B., Zheng, F., Zhao, B., Zhang, H., Wang, Y. & Zhang, Z. (2021). The Multiple Roles of Ascorbate in the Abiotic Stress Response of Plants: Antioxidant, Cofactor, and Regulator.

Frontiers in Plant Science, 12, 598173.

<https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.598173/BIBTEX>

Yeasmin, R., Nakamatsu, K., Matsumoto, H., Motoki, S., Nishihara, E. & Yamamoto, S. (2014). Inference of allelopathy and autotoxicity to varietal resistance of asparagus (*Asparagus officinalis* L.). *Australian Journal of Crop Science*, 8(2), 251–256.

Yeqing, Y., Linjuan, F., Qizhi, L., Weijua, L. & Song, Z. (2018). Effects of Dazomet and Chloropicrin on the Soil Nematode Communities and Nutrient Content of Replanted Strawberry. *Acta Horticulturae Sinica*, 45(4), 725. <https://doi.org/10.16420/J.ISSN.0513-353X.2017-0417>

Yu, Q., Duan, J., Yu, N. & Fan, L. (2020). Enhancing the antityrosinase activity of saponins and polyphenols from Asparagus by hot air coupled with microwave treatments. *LWT*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109174>

Zhang, L., Du, L. & Poovaiah, B. W. (2014). Calcium signaling and biotic defense responses in plants. *Plant Signaling and Behavior*, 9(11). <https://doi.org/10.4161/15592324.2014.973818>