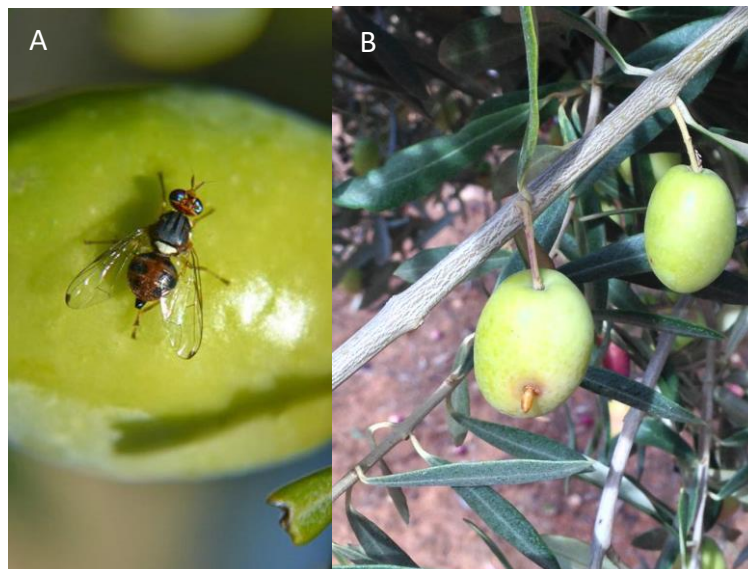


## **RESUMEN EJECUTIVO DEL ESTUDIO: MANEJO INTEGRADO DE LA MOSCA DEL OLIVO MEDIANTE EL SEGUIMIENTO REMOTO DE LA POBLACIÓN Y SU CONTROL MICROBIANO PARA UNA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y DIGITAL**

**Palabras clave:** *Bactrocera oleae*, hongos entomopatógenos, trampa inteligente

### **1. Introducción**

El olivo se considera un elemento clave en la economía de la región y desempeña un papel muy importante en la cultura y la sociedad española (Junta de Andalucía 2012). Por lo tanto, cualquier factor biótico o abiótico que afecte la producción de aceitunas tiene un efecto directo en los ingresos de los productores olivares y en las economías de los estados, como ocurre con la mosca del olivo, la principal plaga del cultivo olivar en todo el mundo (Fernández-Escobar et al., 2013). Las hembras de este temible tefrítido depositan sus huevos dentro de las aceitunas, justo debajo del epicarpio, lo que proporciona un acceso directo al alimento para las larvas justo después de la eclosión de los huevos, que se alimentan del mesocarpo, creando galerías en el interior del fruto a medida que se desplazan (Figura 1). Una vez listas para formar pupas, las larvas de *B. oleae* de la última generación a finales de noviembre-diciembre abren un agujero de salida y caen al suelo para pupar bajo la copa del árbol, donde permanecen hasta la primavera siguiente (Santiago-Álvarez y Quesada-Moraga, 2007) (Figura 1).



**Fig. 1.** A) Hembra adulta picando el fruto; B) Pupa fuera del fruto.

Existe un gran impacto global de *B. oleae* en el cultivo, que va desde la finca a la mesa, con pérdidas económicas que pueden llegar hasta 1000 euros por tonelada, si se pierde toda la cosecha (Malheiro et al., 2015). Los daños afectan a toda la cadena de producción de aceitunas, comenzando en el olivar y afectando gravemente a los productores, pasando por la industria y llegando a los consumidores (Malheiro et al., 2015). El consumo de pulpa por las larvas provoca una grave caída de frutos, afectando la producción de aceitunas y el rendimiento en la cosecha, y aún más importante, da origen a la fermentación de la pulpa que desemboca en baja calidad el aceite de oliva, que suele ser lampante (Malheiro et al., 2015).

Finalmente, para los consumidores, el incremento en las pérdidas de producción significa menos oferta y por tanto precios más altos, productos de menor calidad, la confianza de los consumidores comprometida, aceite de oliva degradado y oxidado con la formación de posibles compuestos peligrosos para la salud, pérdida de propiedades nutricionales, farmacológicas y funcionales debido a cambios en la composición de los aceites de oliva, menor aporte saludable por parte de los consumidores y posible aumento de residuos de insecticidas químicos en los productos debido a las aplicaciones para controlar las poblaciones de *B. oleae* (Malheiro et al., 2015).

Este díptero devastador está presente en todas las zonas de cultivo en España, y su control ha sido objeto de numerosos estudios, siendo los insecticidas químicos los medios de control más ampliamente utilizados durante más de 60 años. De hecho, solo hay cuatro productos químicos autorizados para el olivo en el registro de Productos Fitosanitarios del Ministerio de Agricultura de España (Acetamiprid, Cipermetrina, Deltametrina, Fosmet), y estas moléculas no solo no cumplen con los principios de la sostenibilidad agrícola, sino que también son objeto de desarrollo de resistencia en la mosca del olivo. De hecho, la regulación más reciente de la UE (EU/2016/2031 de 14/12/2019) y la regulación nacional (Real Decreto 1050/2022) exigen nuevas medidas de control efectivas, económicamente viables, sostenibles, respetuosas con el medio ambiente y seguras, lo que sitúa el control de la mosca del olivo como una de las piedras angulares de la olivicultura contemporánea.

En este sentido, la detección fiable y temprana de la mosca y la adecuada cuantificación del daño inducido son cruciales para gestionar y reducir su propagación, mantener la calidad y cantidad de los productos, reducir costes, interrupciones en el comercio y mitigar los riesgos para el medio ambiente y la salud humana (Donatelli et al. 2017, King 2017). El control actual de la mosca del olivo se basa en la monitorización de las moscas

adultas utilizando diferentes tipos de trampas (por ejemplo, trampas McPhail, trampas amarillas adhesivas y otras). Luego, la infestación de los frutos se analiza manualmente para la toma de decisiones sobre la pulverización contra la plaga, lo que resulta en un proceso costoso (costes laborales por hora) y que consume mucho tiempo (Burrack et al. 2008). La digitalización de este proceso mediante el uso de herramientas de monitorización automatizada como las trampas electrónicas (e-trap) proporciona información más precisa sobre la primera detección de la plaga y su abundancia. Además, si el olivar se geolocaliza junto con el monitoreo electrónico, se proporcionará una mejor comprensión de la distribución espacial y temporal de la plaga para los usuarios finales. El agroecosistema del olivo es permanente y dominante en toda la región mediterránea, especialmente en España, y el correcto manejo de su principal amenaza, *B. oleae*, tendría un impacto positivo directo en la sociedad. De hecho, el aumento de la conciencia pública y las demandas sociales sobre los posibles riesgos de los métodos de manejo tradicionales basados en el uso de insecticidas químicos han resultado no solo en la retirada de más del 70% de los ingredientes activos de insecticidas de síntesis en la UE en los últimos 10 años, sino también en la continua prohibición de otros productos convencionales clave y restricciones severas a la comercialización de nuevos compuestos activos. Por lo tanto, la demanda de enfoques y soluciones alternativos y factibles para la protección de las plantas, como los métodos de Manejo Integrado de Plagas (MIP), continúa aumentando. En este sentido, las soluciones ecológicas e inteligentes para el control de plagas se consideran dos pilares esenciales en cualquier programa moderno de MIP. Sin embargo, uno de los principales desafíos actuales de los programas modernos de MIP de agricultura de precisión es que las alternativas efectivas y económicamente viables a los insecticidas sintéticos aún no están suficientemente disponibles y algunas de ellas aún están en desarrollo.

Este estudio incluye alternativas ecológicas e inteligentes muy avanzadas y validadas a gran escala en los últimos años. El grupo de investigación AGR 163 Entomología Agrícola de la Universidad de Córdoba (UCO), ha estado muy comprometido durante los últimos 20 años en el desarrollo de nuevas estrategias de control de plagas. Estrategias inteligentes, seguras y compatibles con las demandas legislativas y sociales actuales. En particular, el Grupo de Investigación AGR 163 “Entomología Agrícola” de la UCO, ha desarrollado varios métodos de control biológico basados en el uso de hongos entomopatógenos (HE) y sus compuestos bioactivos para el control de plagas de insectos. Los HE se consideran una de las mejores y más prometedoras alternativas para el control

de plagas de insectos debido a su modo de acción por contacto, producción en masa viable y potencial para ser desarrollados en tratamientos en suelo y aéreos, con compatibilidad demostrada en publicaciones científicas con otros agentes de control biológico (por ejemplo, parasitoides) o con otras técnicas de control como la técnica de insectos estériles. El reciente descubrimiento de sus nuevas funciones en la naturaleza como endófitos, microorganismos competentes en la rizosfera y potenciadores del crecimiento de las plantas aporta nuevos valores añadidos a los HE que contribuyen aún más a lograr la transición ecológica y la sostenibilidad. En este sentido, el novedoso método para el control de la mosca del olivo validado a gran escala fue desarrollado en varios proyectos y especialmente el Proyecto “AgroMIS: ceiA3 instrumento estratégico hacia un tejido productivo Agroalimentario Moderno, Innovador y Sostenible: motor del territorio rural andaluz. Sublínea: SL2221” llevado a cabo en colaboración con el CeiaA3 y las denominaciones de origen de Andalucía y Cataluña, así como el Proyecto Centros de Excelencia Internacional PYC20 RE-067 UCO “Innovación en la sanidad del olivar a través de tratamientos al suelo con hongos entomopatógenos frente a la mosca del olivo y sus beneficios adicionales sobre la planta. OLIVEFUNGI” llevado a cabo en colaboración con el laboratorio de Sanidad Vegetal de la Junta de Andalucía. Este método de control se presenta como un método eficaz y económicamente viable para el control de la mosca del olivo, ya que las aplicaciones experimentales han mostrado resultados excelentes. Además, la validación a gran escala llevada a cabo en este proyecto ha proporcionado una mejora de los resultados obtenidos anteriormente en parcelas de 1ha. El producto en base al HE *M. brunneum* (cepa EAMa 01/58-Su) está en desarrollo comercial y ha demostrado que controla las etapas inmaduras en el suelo y reduce las poblaciones de *B. oleae* en primavera en un 50-70% en parcelas de 1ha.

Este es un paso sin precedentes que utiliza un agente de control microbiano ecológico (seguro para la salud humana y la vida silvestre) como material activo para controlar este fitófago. Esta tecnología ha llamado la atención de empresas multinacionales como Koppert Biological Systems B.V., con la reciente licencia de la cepa fúngica de la UCO que finalmente podría beneficiar a todas las partes interesadas y promover la transición ecológica en el cultivo del olivo.

El seguimiento de poblaciones de artrópodos fitófagos, así como el conocimiento de los niveles de intervención, nivel económico de daños y umbral de tolerancia, son la base de cualquier programa de MIP. Sin embargo, en lo que respecta a la mosca del olivo, aún se utilizan estrategias de seguimiento y toma de decisiones basadas en observaciones y en

la experiencia acumulada del usuario, que requieren una optimización, en especial ante el escenario del desarrollo de nuevos modelos de trampas semiautomáticas y automáticas. El componente inteligente del estudio consiste en un sistema de trampas de monitoreo automatizado que incluye un servicio completo para agricultores y empresas con datos precisos y en tiempo real sobre la evolución y abundancia de la mosca del olivo, así como un conjunto de servicios electrónicos que respaldan la toma de decisiones para el control del tefrítido (Garrido-Jurado, 2021). Nuestro grupo de investigación está involucrado en el desarrollo y comercialización de este sistema innovador mediante la cooperación y coordinación con otros grupos de investigación europeos dentro del Proyecto ENI CECMED FruitFlyNet II y en el Proyecto del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación TED2021-132458B-I00 (orientado a la transición ecológica y digital) para desarrollar una solución completa para los agricultores para realizar el seguimiento electrónico de la mosca del olivo.

## **2. Material y métodos**

### **2.1. Validación a gran escala del método ecológico innovador basado en aplicaciones al suelo de la cepa autóctona EAMa 01/58-Su de *M. brunneum* para el control de la mosca del olivo**

#### **2.1.1. Material fúngico utilizado**

La cepa EAMa 01/58-Su del HE *M. brunneum* pertenece a la micoteca del Grupo de Investigación AGR-163 "Entomología Agrícola" del Departamento de Agronomía, Unidad de Excelencia María de Maetzu DAUCO, de la Universidad de Córdoba y ha sido depositada en la Colección Española de Cultivos Tipo con el número de acceso CECT 20764. Esta cepa, procedente de un suelo de cultivo de trigo en la provincia de Córdoba, se conserva liofilizada a  $-80^{\circ}\text{C}$  para favorecer su conservación a largo plazo. La producción en masa y la formulación de los productos experimentales se realizó en las instalaciones que la empresa Koppert Biological Systems B.V. posee en Brasil proporcionando un producto comercial con una concentración de  $1 \times 10^8$  conidios viables por gramo.

#### **2.1.2. Diseño experimental**

Se realizaron dos ensayos con el certificado de Buenas Prácticas Experimentales (BPE) para productos fitosanitarios, requisito para el futuro registro comercial del hongo. El primer ensayo tuvo como objetivo estudiar el efecto de la dosis aplicada al suelo sobre la

eficacia de control y el segundo la validación del método de control en un área más extensa (gran escala).

En la Tabla 1 se resumen las características de las fincas experimentales de ambos ensayos.

**Tabla 1.** Características de las fincas usadas en el estudio.

Tipo de ensayo	Localidad	Coordenadas	Superficie (ha)	Variedad	Edad de árboles (años)	Marco de plantación (m)
Dosis	Fuensanta de Martos	X: 416799.42 Y: 4168712.49	12	Picual	150-200	10x10
Gran escala	Mogón	X: 498579.46 Y: 4212426.42	80	Picual	150-200	10x10

Para el ensayo de dosis, se dividió la finca en 12 parcelas de 1 ha cada una (100 árboles) donde se realizaron tres tratamientos con 4 réplicas cada uno (Figura 2). El primer tratamiento consistió en 2.5 g del formulado por árbol (250 g/ha), el segundo 1.5 g por árbol (150 g/ha) y el tercero un control sin aplicación de hongo. Se realizó una aplicación anual al suelo bajo la copa de árbol, en coincidencia con la caída de

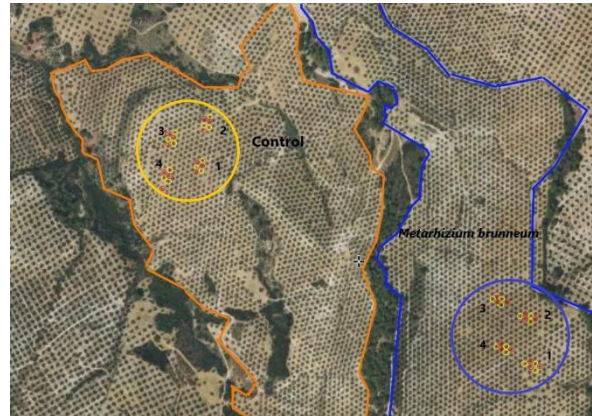


**Fig. 2.** Diseño experimental del ensayo de dosis.  
Fuente: visor SigPac y elaboración propia.

larvas de *B. oleae* al suelo para pupar bajo la copa del árbol en octubre. La aplicación del hongo se realizó con un Quad equipado con barra de herbicida con la cual se pulverizó una suspensión del hongo de 150 litros/ha.

Para el ensayo de gran escala se dividió la finca en dos parcelas de 40 ha, una tratada con el HE y la otra a modo de control sin tratar (Figura 3). El tratamiento se realizó siguiendo la misma metodología descrita anteriormente y con la dosis de 2.5 g/árbol.

Después del tratamiento se evaluó el efecto de la aplicación fúngica sobre la población de *B. oleae* que emergió del suelo en primavera (desde marzo hasta mayo) mediante conteos semanales del número de adultos capturados en los dos tipos de trampas usadas para este fin (trampas Mcphail y trampas amarillas).



**Fig. 3.** Diseño experimental del ensayo en un área extensa. Fuente: visor SigPac y elaboración propia.

## 2.2. Optimización del sistema de seguimiento de la mosca del olivo para la toma de decisiones y el diseño del conjunto de trampas y servicios electrónicos.

Para la realización de los ensayos, se ha contado con una finca experimental ubicada en la localidad de Alcolea (Córdoba), con el Banco Mundial de Germoplasma de Olivo perteneciente a la Universidad de Córdoba, sito en la finca del Campus Universitario de Rabanales, así como otra finca ubicada en el término municipal de Olvera (Cádiz) (Tabla 2; Figura 4). Todos los ensayos se repitieron dos veces durante las campañas 2021 y 2022.

**Tabla 2.** Caracterización de las fincas experimentales

Ubicación	Coordenadas	Polígono y	Superficie	Tipo de	Variedad	Manejo
Zona de ensayos	UTM	Parcela	ha	olivar		
Finca Rivera Alta	X: 357.872,25	Polígono 72	230	Intensivo	varias	Integrado
(Alcolea)	Y: 4.201.905,44	Parcela39-1				
Banco mundial de Germoplasma (UCO)	X: 348.872.93583	Polígono 74	8	Intensivo	Varias	Convencional
	Y:4.199.218,74	Parcela86-4				
Olvera (Cádiz)	X: 295.726,2999250;	Polígono 43	2.69	Intensivo	Verdial de Huelva	Integrado
	Y:4.090.951,476450	Parcela 1				



**Fig. 4.** Fincas experimentales. A) Parcela ubicada en Alcolea (Córdoba); B) Parcela experimental de Olvera (Cádiz); C) Banco mundial de germoplasma de olivo de la UCO en la finca de Rabanales. Tomado de IBERPIX.

### 2.2.1. Optimización del tipo de trampa a utilizar para la captura de la mosca del olivo.

Se evaluaron 6 tipos de trampas: cromotrópica adhesiva verde, Delta blanca con base amarilla, cromotrópica adhesiva amarilla, mosquero tipo Mcphail, Delta amarilla con base amarilla y Delta amarilla con base blanca (Figura 5). Todas fueron cebadas con fosfato de amonio 4%. Las trampas se colocaron en Alcolea (Córdoba) en la variedad ‘Picual’ en filas con 50 metros de separación entre trampas dentro de la fila y entre filas, en un total de 6 filas y 36 trampas formando un cuadrado latino con una superficie de 6 ha. Durante el mes de septiembre coincidiendo con la segunda generación de adultos, se evaluaron cada 3-4 días contabilizando el número adultos *B. oleae* y de enemigos naturales por trampa y día, rotando cada trampa a la siguiente posición dentro de cada fila hasta que se completó una vuelta.



**Fig. 5.** Tipos de trampas utilizadas en el ensayo. A) Trampa cromotrópica adhesiva verde; B) Delta blanca con base amarilla; C) Trampa cromotrópica adhesiva amarilla; D) Trampa Mcphail; E) Delta amarilla con base amarilla, F) Delta amarilla con base blanca.



## 2.2.2. Trampas cromotrópicas adhesivas

### 2.2.2.1. Optimización del color de la trampa

Se emplearon trampas cromotrópicas adhesivas de diferentes colores: amarillas, verdes, azules y blancas. El ensayo fue realizado en la finca experimental de Olvera (Cádiz). Su distribución fue de forma correlativa en la variedad ‘Verdial de Huelva’ en un marco de 4 x 4 empleando los cuatro colores por fila con un total de 4 filas y 16 trampas (Figura 6).

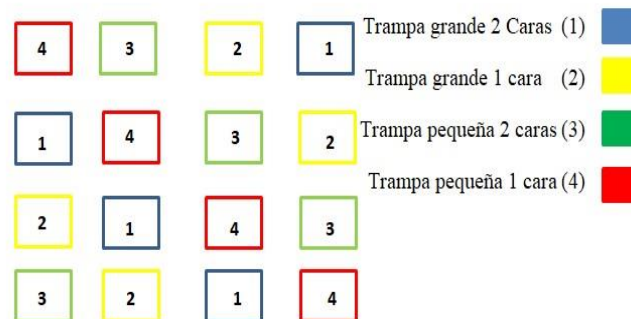
De forma semanal durante un periodo de seis meses, se realizó un seguimiento en el que se contabilizó el número de adultos de la mosca y de enemigos naturales por trampa y día, coincidiendo con el periodo de trampeo habitual de las dos generaciones de la mosca del olivo y con las distintas etapas fenológicas del fruto.



**Fig. 6.** Diseño experimental y distribución espacial de las trampas cromotrópicas adhesivas de diferentes colores.

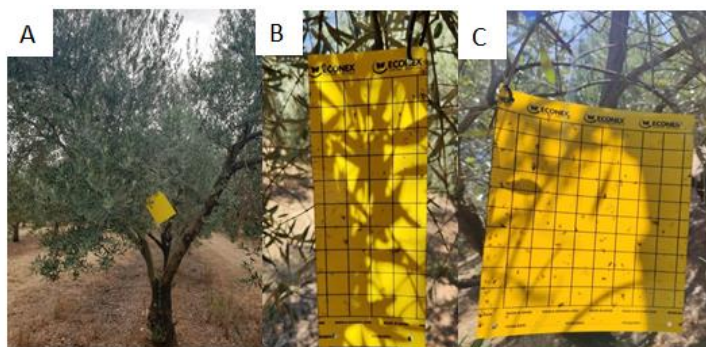
### 2.2.2.2. Optimización del tamaño de la trampa

Se emplearon trampas cromotrópicas adhesivas amarillas de diferente superficie aplicando las siguientes combinaciones: trampa cromotrópica amarilla 10 x 25 cm a dos caras y a una cara, trampa cromotrópica amarilla 20 x 25 cm a dos caras y a una cara (Figura 7).



**Fig. 7.** Diseño experimental y distribución de las trampas cromotrópicas adhesivas amarillas de diferentes tamaños.

Su distribución fue de forma correlativa. En ambos casos se colocaron en un marco de 4 x 4 m empleando los cuatro tipos por fila con un total de 4 filas y 16 trampas (Figura 8). Se realizó un seguimiento de forma semanal durante un periodo de seis meses, en el que se contabilizaba el número de adultos de la mosca del olivo y de enemigos naturales por trampa y día.



**Fig. 8.** Trampas cromotrópicas adhesivas amarillas de diferente superficie empleadas en el ensayo. A) Colocación de la trampa en el olivo; B) Trampa pequeña 10x25 cm; C) Trampa grande 20x25 cm.

### 2.2.2.3. Optimización de la densidad de trampas cromotrópicas adhesivas amarillas sobre la precisión en la estimación de la población de adultos de la mosca del olivo

Durante las campañas 2021 y 2022 se llevaron a cabo dos ensayos para evaluar el efecto de la densidad de la trampa cromotrópica adhesiva amarilla sobre la precisión en la estimación de la población de adultos de la mosca del olivo. En el ensayo realizado durante la primera campaña 2021, se emplearon un total de 50 trampas cromotrópicas adhesivas amarillas, de las cuales 8 fueron cebadas con fosfato de amonio 4% y los 42 restantes sin cebar. Para llevar a cabo el ensayo, las trampas fueron distribuidas en la variedad ‘Picual’ en Alcolea (Córdoba), a distancias mínimas de 30 m (entre trampas cebadas con fosfato de amonio 4% y no cebadas) y a 20 m mínima (entre trampas no cebadas) (Figura 9) con una superficie total de 3 ha. De forma semanal durante un



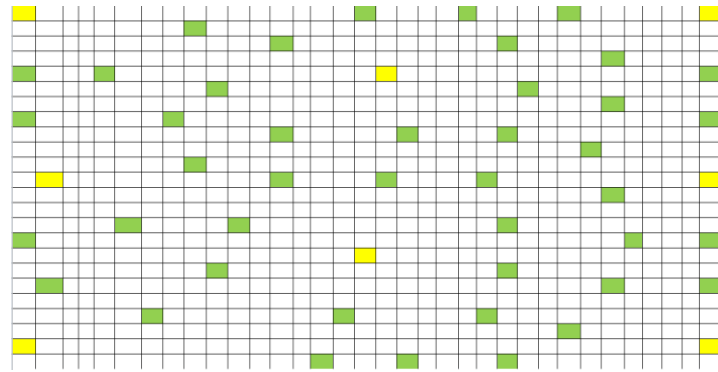
**Fig. 9.** Ensayo para optimizar la densidad y disposición de las trampas cromotrópicas adhesivas en 2021. Colocación de trampas cromotrópicas. A) Trampa cebada; B) Trampa no cebada.

periodo de seis meses se realizó un seguimiento contabilizando la presencia de mosca en cada trampa (Figura 10).

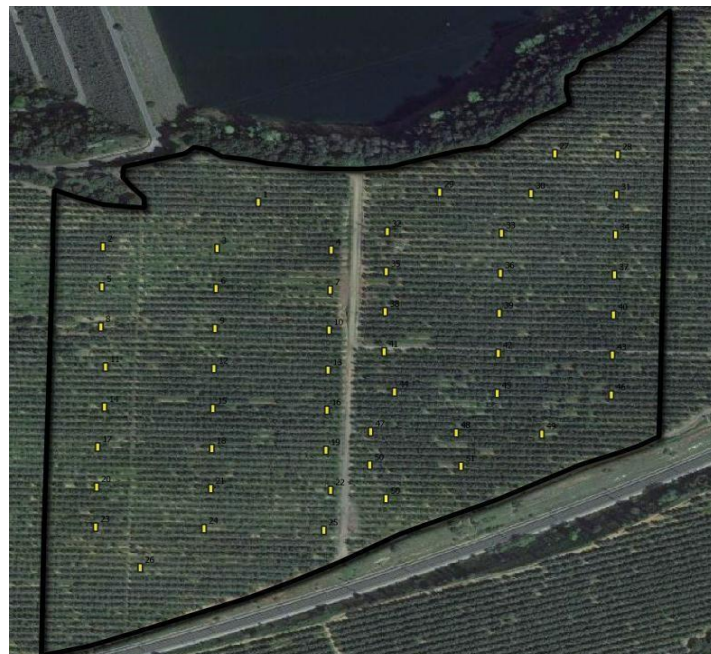
En este ensayo, nuestro objetivo fue establecer modelos de “ajuste” para calcular el número de trampas óptimo que permitan estimar de una manera eficiente y precisa el número medio de insectos por trampa en una parcela elemental y la

distancia entre ellas. En los modelos de ajuste, el objetivo es aumentar la precisión de diferentes estadísticos de la unidad experimental considerada, ej. Parcela elemental, para la comparación entre tratamientos, toma de decisiones etc.

En el segundo año, las 50 trampas se distribuyeron colocando 2 por hectárea en las variedades ‘Picual’ y ‘Nevado azul’ en un total de 26 ha (Figura 11), en base a los resultados obtenidos en el primer ensayo realizado en 2021, aunque todas las trampas estuvieron cebadas. El seguimiento de la población llevado a cabo fue el mismo que en el primer año.



**Fig. 10.** Ensayo para optimizar la densidad y disposición de las trampas cromotrópicas adhesivas en 2021. Trampa cebada con fosfato de amonio al 4% (amarillo), trampa no cebada (verde).



**Fig. 11.** Ensayo para optimizar la densidad y disposición de las trampas cromotrópicas adhesivas en 2022.

### 2.2.3. Evaluación del efecto de la variedad sobre la curva de daño de la mosca del olivo

Mediante el empleo del sistema de seguimiento indicado en la actualidad en la guía de cultivo del olivo, se ha estimado el efecto de la variedad del olivo sobre la curva de daño de *B. oleae* a partir de seis variedades situadas en la misma finca experimental de Alcolea (Córdoba). Para ello, se instalaron tres

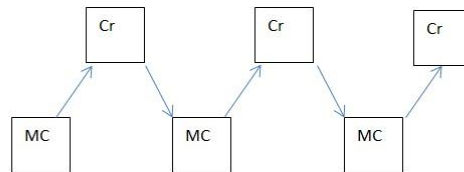
trampas cromotrópicas amarillas 20 x 25 cm y tres trampas Mcphail cebadas con fosfato de amonio al 4% por cada variedad en la cara suroeste del olivo de acuerdo con lo prescrito en la guía

de GIP del (MAPA 2021) (Figura 12).

Las variedades evaluadas fueron: 'Picual', 'Nevado azul', 'Koroneiki',

'Frantoio', 'Arbequina' y 'Empeltre'. Para contabilizar el porcentaje de picada, semanalmente se tomó una muestra de 100 frutos por cada olivo con trampa (25 aceitunas de cada orientación). El seguimiento del ensayo se realizó semanalmente desde su

instalación a mediados de junio hasta que se cosecho la última variedad a principios de diciembre. De forma paralela a la toma de muestra del fruto para evaluar el porcentaje de picada (Figura 13), también se contabilizó la presencia de parasitación por variedad. Para ello el fruto que estaba picado se almacenaba en cajitas de plástico y por un periodo de tiempo se observaba si emergía algún parasitoide de este díptero.



**Fig. 12.** Ensayo para obtención de la curva de daño de *B. oleae* en distintas variedades. Esquema de colocación de las trampas. Cr (Trampa cromotrópica adhesiva); Mc (Trampa Mcphail).



**Fig. 13.** Ensayo para obtención de la curva de daño de *B. oleae* en distintas variedades. Evaluación de daño en el fruto.

#### **2.2.4. Establecimiento y eficacia del sistema digital de seguimiento y control de la mosca del olivo.**

El sistema de seguimiento y soporte electrónico se compone de tres capas:

- Capa de IoT: consta de nodos de trampas inteligentes de IoT que intercambian información con las pasarelas locales de la capa de cómputo en la nube. Los nodos de IoT esencialmente envían información obtenida por sus sensores y reciben comandos remotos tanto de las pasarelas de cómputo en la nube como de la nube.
- Capa de cómputo en la nube: las pasarelas de cómputo en la nube proporcionan a los nodos de IoT desplegados servicios de cómputo en la nube y fusión de sensores que son conscientes de la ubicación, reducen la latencia de respuesta y disminuyen las cargas de comunicación con la nube.
- Capa de servicios remotos: recopila los datos del sistema a través de la nube, los almacena en una base de datos y los procesa para mostrarlos de manera amigable a los usuarios remotos. Además, los servicios remotos de esta capa pueden hacer uso de servicios de terceros, como pronósticos del tiempo, al tomar decisiones sobre la pulverización. La trampa electrónica utilizada en el sistema es la trampa adhesiva amarilla, como se demuestra en ensayos anteriores que es una trampa cromotrópica provista de un atrayente olfativo para la mosca del olivo (fosfato de diamonio). Se utiliza un panel solar para proporcionar a la trampa la energía necesaria para ser un sistema autosuficiente. La cámara toma dos fotografías al día y envía esta información al ordenador central para que sea analizada por un entomólogo.

Los pasos seguidos en este sentido fueron:

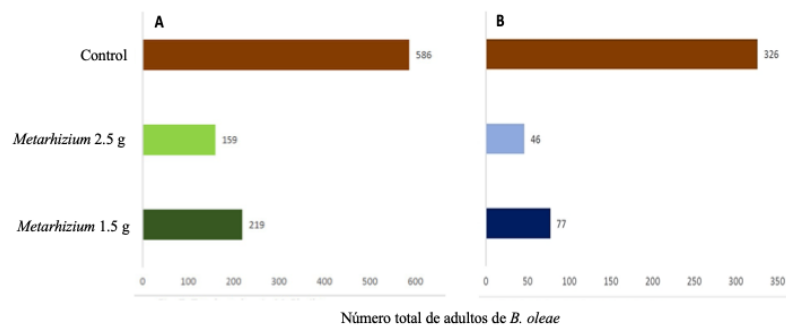
1. La adquisición de los componentes electrónicos (microprocesores, cámaras, placas solares, tarjetas SIM 4G necesarios para la construcción de los prototipos de trampas.
2. La impresión de las carcasas de las trampas mediante impresora de 3D.
3. El ensamblaje de los componentes de las trampas y su funcionamiento en el laboratorio y posteriormente en el campo.
4. La digitalización de la finca experimental mediante la geolocalización de todos los árboles, trampas, zonas protegidas, etc.
5. La creación de una plataforma para la identificación semiautomática de los adultos de la mosca del olivo.

Finalmente se instalaron en el campo 15 trampas semiautomáticas programadas para enviar 2 fotos diarias al servidor central. Un entomólogo del grupo de investigación identificaba los insectos fotografiados en cada una de ellas.

### 3. Resultados

#### 3.1. Validación a gran escala del método ecológico innovador basado en aplicaciones al suelo de la cepa autóctona EAMa 01/58-Su de *M. brunneum* para el control de la mosca del olivo

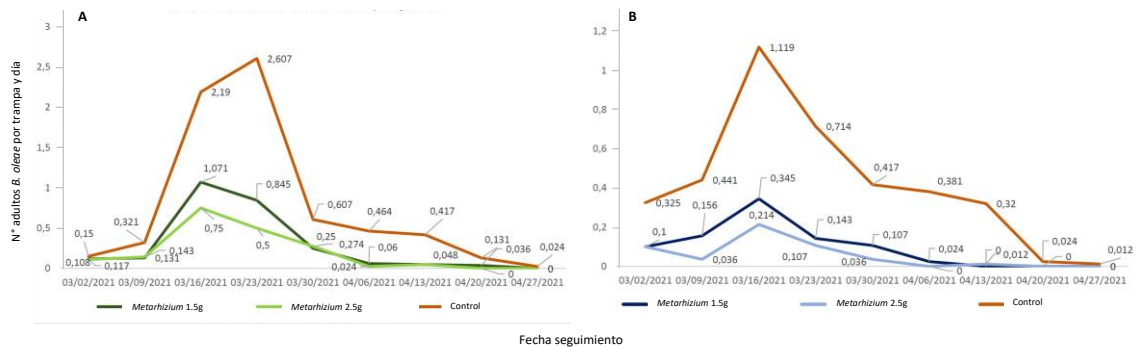
El producto experimental a base de conidios de la cepa EAMa 01/58-Su *M. brunneum* aplicado al suelo en dos dosis tuvo un efecto significativo sobre la población de la mosca del olivo emergente del suelo durante primavera en ambas dosis comparado con el control. Sin embargo, la dosis 2.5 g/árbol fue la que más reducción ha causado en la emergencia de adultos de la mosca en



**Fig. 14.** Capturas totales de adultos de *B. oleae* emergentes del suelo en primavera en parcelas tratadas con dos dosis la cepa EAMa 01/58-Su de *M. brunneum* (250 g/ha y 150 g/ha) y control. A) capturas en trampas McPhail, B) capturas en trampas cromotrópicas adhesivas.

primavera. Existió una reducción del 70-90% en las capturas totales (trampas McPhail y cromotrópicas adhesivas) de adultos de *B. oleae* en parcelas tratadas con respecto al control (Figura 14).

La reducción en la población de la mosca del olivo emergente del suelo fue significativa durante todo el periodo de seguimiento en la dosis 2.5 g/árbol con capturas máximas de 0.7 y 0.2 adultos por trampa y día en trampas McPhail y cromotrópicas adhesivas, respectivamente, mientras que fue de 2.6 y 1.1 adultos por trampa y día en el control en trampas McPhail y cromotrópicas, respectivamente (Figura 15).



**Fig. 15.** Densidad de la población de *B. oleae* en fincas tratadas y control tras la aplicación de dos dosis de la cepa EAMa 01/58-Su de *M. brunneum* en el suelo bajo la copa del árbol. A) capturas en trampas McPhail, B) capturas en trampas cromotrópicas adhesivas.

Por otro lado, la aplicación a gran escala de la cepa EAMa 01/58-Su de *M. brunneum* al suelo con la dosis de 2.5 g/árbol causó una reducción significativa de la población de adultos de la mosca del olivo emergentes del suelo durante primavera. Las

capturas máximas de adultos de *B. oleae* en la finca tratada fueron de 6.5 adultos por trampa y día frente a 28.3 adultos por trampa y día en la finca control causando así una reducción del 80% en la población de la mosca del olivo (Figura 16).



**Fig. 16.** Densidad de la población de *B. oleae* en la zona tratada y control tras la aplicación en amplia extensión de la cepa EAMa 01/58-Su de *M. brunneum* en el suelo bajo la copa del árbol con la dosis de 2.5 g/árbol. La figura representa la suma de las capturas en trampas McPhail y trampas cromotrópicas en las parcelas tratada y control.

### 3.2. Optimización del sistema de seguimiento de la mosca del olivo para la toma de decisiones y el diseño del conjunto de trampas y servicios electrónicos.

### 3.2.1. Optimización del tipo de trampa a utilizar para la captura de la mosca del olivo.

Se apreciaron diferencias significativas tanto en la captura de mosca ( $F_{5, 175} = 6.63$ ,  $P \leq 0.001$ ), como de enemigos naturales ( $F_{5, 175} = 33.94$ ,  $P \leq 0.001$ ), con la trampa Mcphail como la que más capturas realizó, seguida de la trampa cromotrópica adhesiva amarilla y de la cromotrópica adhesiva verde (Figura 17). Sin embargo, la trampa Mcphail fue también la que más enemigos naturales capturó mostrando diferencias significativas entre las trampas restantes (Figura 17). Las trampas menos viables resultaron ser las Deltas puesto que capturaron

una baja cantidad de mosca y por el contrario una alta población de enemigos naturales (Figura 17). **Por ello se recomienda la trampa cromotrópica adhesiva para los siguientes ensayos de color y superficie.**

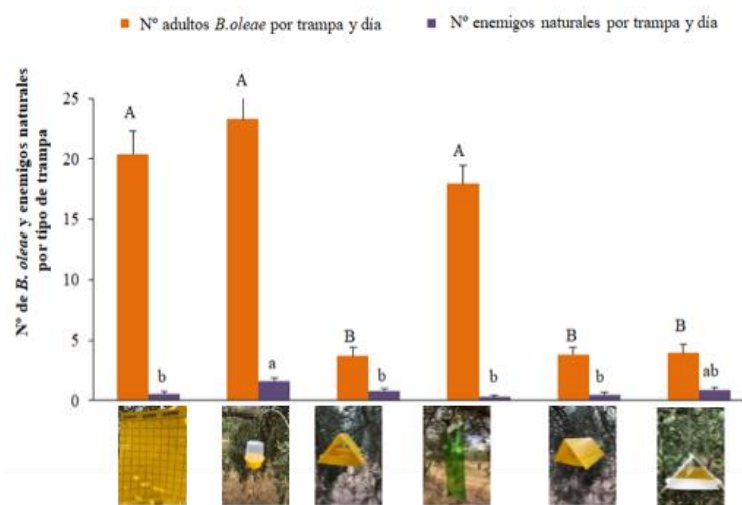


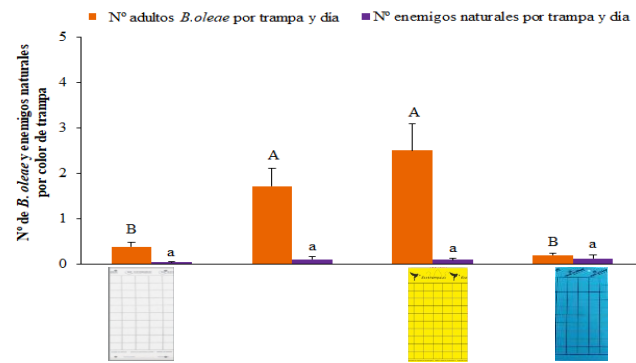
Fig. 17. Captura de *B. oleae* y enemigos naturales por tipo de trampa. Barras con la misma letra indican que no existieron diferencias significativas en una prueba Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 3.2.2. Evaluación del efecto del color de la trampa cromotrópica adhesiva sobre la captura de la mosca del olivo y de los enemigos naturales

El color de la trampa cromotrópica adhesiva presentó un efecto significativo sobre la captura de mosca en todas las fechas, donde destacaron las comprendidas entre el 27 de octubre y el 4 de noviembre 2022 ( $F_{3, 253} = 19.76$ ,  $P \leq 0.001$ ), siendo la trampa amarilla la que más población de mosca capturó en todo el ensayo seguida de la verde (Figura 18).



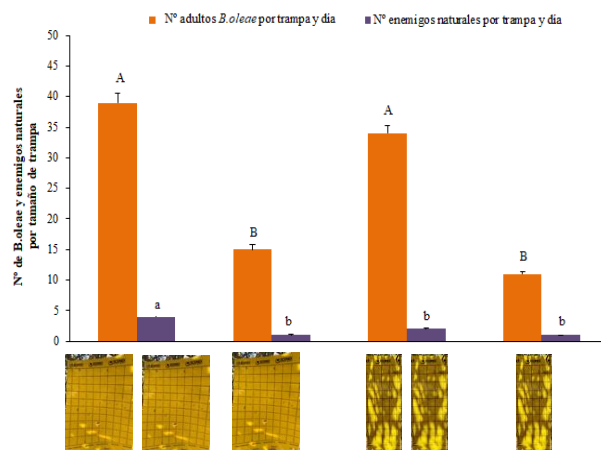
Respecto a la captura de enemigos naturales, no se apreciaron diferencias significativas ( $F_{3, 253} = 0.37$ ,  $P=0.777$ ). Es por ello por lo que se mantiene que la trampa cromotrópica adhesiva amarilla sigue siendo la más adecuada comercialmente para el seguimiento de este díptero.



**Fig. 18.** Captura de *B. oleae* y enemigos naturales en función del color de la trampa cromotrópica adhesiva a lo largo del periodo de estudio. Barras con la misma letra indican que no existieron diferencias significativas en una prueba Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 3.2.3. Evaluación del efecto del tamaño de la trampa cromotrópica adhesiva sobre la captura de la mosca del olivo y de los enemigos naturales

Existieron efectos significativos de la superficie de la trampa y de su reversibilidad tanto en las capturas de mosca ( $F_{3,273} = 18.67$ ,  $P < 0.001$ ) como de enemigos naturales ( $F_{3,273} = 15.10$ ,  $P < 0.001$ ) (Figura 19). La trampa grande (20 x 25 cm) a dos caras y la pequeña (10 x 25 cm) a dos caras, capturaron prácticamente lo mismo. Sin embargo, las diferencias significativas que se muestran en la captura de enemigos naturales indican que la trampa grande a dos caras capturó más enemigos naturales que trampas restantes (Figura 19). Se observó una alta captura de mosca en la trampa grande (20 x 25 cm) a dos caras seguida de la pequeña (10 x 25 cm) a dos caras (Figura 19), a la inversa de lo que ocurrió con la captura de enemigos naturales, donde se observó más presencia de enemigos naturales en la trampa grande a dos caras que en la pequeña a dos caras (Figura 19), lo que es un factor clave para reducir el coste e impacto ambiental del sistema de seguimiento.



**Fig. 19.** Captura de *B. oleae* y enemigos naturales en función del tamaño de la trampa cromotrópica adhesiva a lo largo del periodo de estudio. Barras con la misma letra indican que no existieron diferencias significativas en una prueba Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 3.2.4. Evaluación del efecto de la densidad de trampas cromotrópicas adhesivas amarillas sobre la precisión en la estimación de la población de adultos de la mosca del olivo

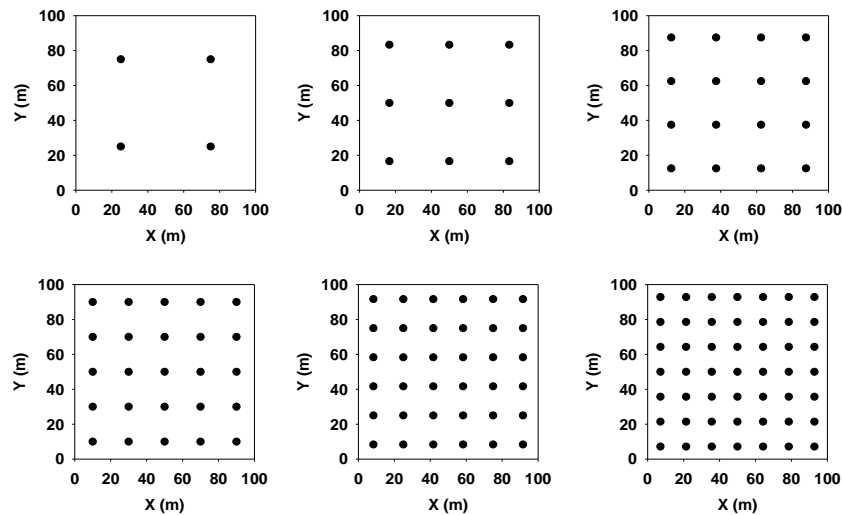
En los resultados obtenidos en el periodo 2021, se observó un mayor efecto atractivo en las trampas cebadas con fosfato amónico al 4%, mostrando un número superior de capturas medias de *B. oleae* y menor coeficiente de variación (CV) que las trampas no cebadas (Tabla 3). En el año 2022, en el que solo se utilizaron trampas cebadas, se observó un menor número de capturas por trampa, con mayor coeficiente de variación en comparación a las capturas con trampas cebadas de 2021 (Tabla 3).

En el año 2021, los datos fueron modelizados con trampas cebadas y no cebadas por separado y también con ambos tipos de trampas combinadas, no observándose diferencias relevantes, y por lo tanto combinándose para el resto de los análisis.

**Tabla 3.** Valores medios y rangos del número de insectos por trampa, desviación estándar y coeficiente de variación de las distintas fechas de muestreo (trampas cebadas y no cebadas).

Año	Trampa	No. Medio Moscas/trampa	Desviación Estandar	Coefficiente Variación
2021	no cebada	19.60 (5.90-61.90)	14.30 (4.80-34.40)	88.50 (55.60-128.90)
	cebada	41.40 (5.60-95.00)	19.60 (5.60-36.80)	70.10 (30.10-162.70)
2022	cebada	9.30 (0.34-27.30)	9.20 (1.1-25.20)	130.40 (79.1-328.10)

Para la determinación de la distancia entre trampas, se barajaron diferentes escenarios con diferentes números de trampas por parcela (Figura 20). En una parcela de 100 x 100 m (1 ha), se dispusieron respectivamente 4, 9, 16, 25, 36 y 49 trampas de acuerdo con distintas distribuciones (Figura 20). Los resultados obtenidos mediante el semivariograma con modelo esférico y la simulación con modelos lineales generalizados mixtos (distribución=Poisson, función de enlace= logaritmo), proporcionaron el intervalo de confianza (95%) para el número medio de moscas por trampa en función del número de trampas utilizadas obteniéndose un valor medio entre trampas de 48.54 m. A distancias superiores al rango, las observaciones no están correlacionadas (Tabla 4).

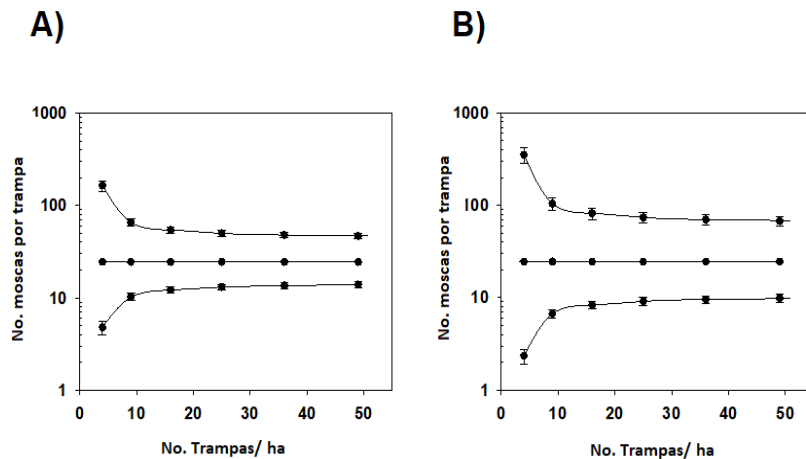


**Fig. 20.** Modelos espaciales empleados para la determinación de la distancia máxima entre trampas. Se utilizaron combinaciones de 4, 12, 16, 20, 36 y 49 trampas a las distancias indicadas en los ejes.

**Tabla 4.** Valores medios de las covarianzas obtenidas con el modelo de semivariograma esférico con 2 parámetros. Los valores son la media de las distintas fechas de muestreo para los dos años evaluados.

Año	Covarianza esférica	Covarianza residual
2021	40.2 (23.0-55.1)	1.33 (0.5-2.1)
2022	56.88 (29.68-115.0)	2.19 (1.0-4.2)

También se optimizó el número de trampas a emplear por hectárea mediante la simulación con el modelo lineal generalizado (Figura 21). Se observa que en los dos años las curvas de precisión del número medio de moscas por trampa en función del número de trampas son similares, aunque en el año 2022 hay más variabilidad como se afirma anteriormente (Tablas 3 y 4). De esta forma se ha observado que un número de 15 trampas por hectárea serían las necesarias para un monitoreo óptimo; a medida que el número de trampas aumenta, también lo haría la precisión de la captura media de moscas por trampa, aunque alcanzando un número determinado de trampas (15 en este caso), el incremento en la precisión es mínimo y no justificaría el aumento del número de estas.



**Fig. 21.** Representación del semivariograma que representa el comportamiento espacial de los adultos (número de captura por trampa) en función de la vecindad de otra trampa. A) Año 2021; B) Año 2022.

### 3.2.5. Evaluación del efecto de la variedad sobre la curva de daño de la mosca del olivo

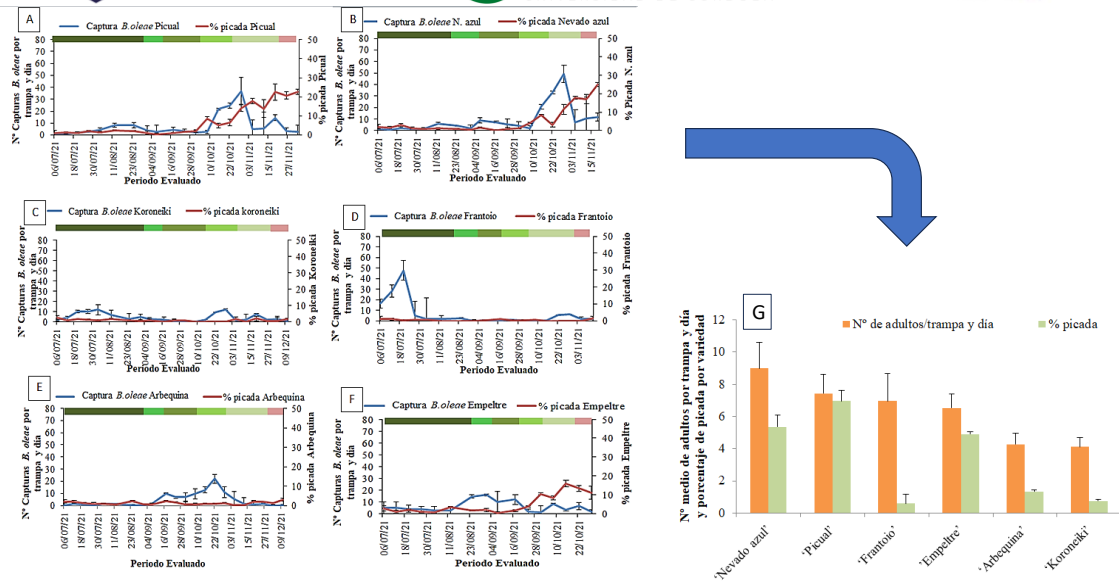
Los resultados obtenidos durante los dos años evaluados mostraron diferencias significativas entre campañas (2021 y 2022) tanto en la captura de población ( $F_{1,1485}=63.06$ ;  $P \leq 0.001$ ) como en picada ( $F_{1,1485}=132.54$ ;  $P \leq 0.001$ ) de *B. oleae*. El año 2021 presentó niveles de población de mosca significativamente más altos (6.30 moscas de media por trampa y día) comparado con 2.16 moscas de media por trampa y día en 2022, lo que se traduce en nivel de daño (picadura) significativamente más alto en el 2021 (3.44 % de picada media) comparado con 0.75% de picada media en 2022. También se observaron diferencias significativas en la captura entre variedades ( $F_{5,737}=2.75$ ;  $P \leq 0.001$ ), mostrando en el periodo 2021 una mayor captura de población en las variedades ‘Nevado azul’ y ‘Picual’ con captura medias de 9.00 y 7.43 moscas por trampa y día. Las variedades ‘Frantoio’ y ‘Empeltre’ presentaron una captura media de 6.95 y 6.52 moscas por trampa y día y ‘Arbequina’ y ‘Koroneiki’ las que menor captura con 4.28 y 4.11 capturas por trampa y día (Tabla 5). Aunque la presencia de *B. oleae* fue mayor en unas variedades respecto a otras, no se reflejó de igual forma en el daño mostrando diferencias significativas entre ellas ( $F_{5,737}=34.23$ ;  $P < 0.001$ ) Así en el periodo 2021, la variedad ‘Picual’ presentó un mayor porcentaje de daño (6.95%) seguida de las variedades ‘Nevado azul’ (5.35%) y ‘Empeltre’ (4.90%) y en menor medida las variedades ‘Arbequina’ (1.34), ‘Koroneiki’ (0.75%) y ‘Frantoio’ (0.59%) (Tabla 5).

Hay que destacar que variedades como 'Empeltre' y 'Frantoio', con semejantes niveles de captura media, 6.52 y 6.95 moscas por trampa y día, presentaron niveles muy diferentes de picada, con 4.90% y 0.59% respectivamente. La variedad 'Arbequina' también presenta una captura de 4.30 moscas por trampa y día y un porcentaje de daño bajo respecto a 'Empeltre', mientras que las restantes variedades siguen una tendencia en cuanto a captura y porcentaje de picada.

**Tabla 5.** Influencia varietal sobre las capturas y la picada de *B. oleae* en 2021 (los valores indican media  $\pm$ EE).

Variedad	Nº de adultos/trampa y día ( $\pm$ EE)	% picada ( $\pm$ EE)
'Nevado azul'	9.00 $\pm$ 1.59 a	5.35 $\pm$ 0.75 a
'Picual'	7.43 $\pm$ 1.21 a	6.95 $\pm$ 0.68 b
'Frantoio'	6.95 $\pm$ 1.72 ab	0.59 $\pm$ 0.57 b
'Empeltre'	6.52 $\pm$ 0.90 ab	4.90 $\pm$ 0.14 c
'Arbequina'	4.28 $\pm$ 0.67 b	1.34 $\pm$ 0.10 c
'Koroneiki'	4.11 $\pm$ 0.60 b	0.75 $\pm$ 0.10 c

En los meses de verano se observó una baja presencia de población a diferencia de los meses de octubre y noviembre, cuando se produjo un aumento en la población alcanzando capturas máximas de 49 y 37 moscas por trampa y día para las variedades de 'Nevado azul' y 'Picual' (Figura 22A y 22B). Las restantes variedades a excepción de 'Empeltre' y 'Frantoio', también alcanzaron su máximo de capturas en esos meses, 'Koroneiki' con 12 capturas por trampa y día (Figura 22 C) y 'Arbequina' con 22 capturas por trampa y día (Figura 22 E). 'Frantoio' presentó su pico máximo en periodo estival con 48 moscas por trampa y día (Figura 22 D) y la variedad 'Empeltre' en septiembre con 16 moscas por trampa y día (Figura 22 F).

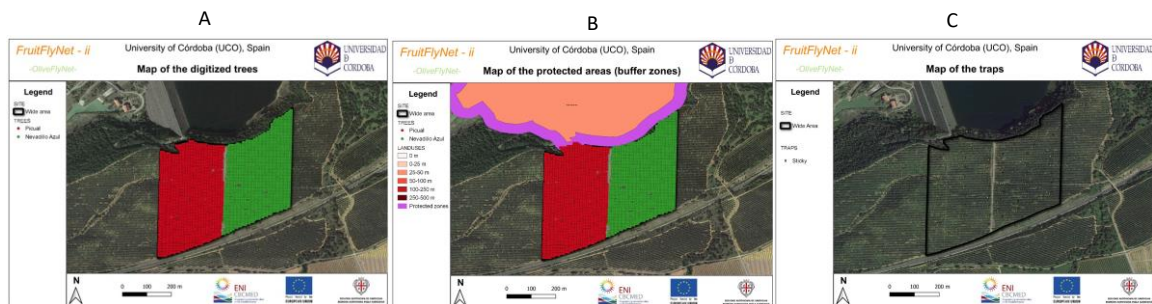


**Fig. 22.** Curva de daño que representa la relación entre la densidad poblacional y la picadura para las distintas variedades. A) ‘Pical’; B) ‘Nevado azul’; C) ‘Koroneiki’; D) ‘Frantoio’; E) ‘Arbequina’ y F) ‘Empeltre’. G) Captura media de *B. oleae* y porcentaje de picada por variedad. Barras con la misma letra indican que no existieron diferencias significativas en una prueba Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 3.3. Establecimiento y eficacia del sistema digital de seguimiento y control de la mosca del olivo.

#### 3.3.1. Digitalización de la finca experimental

Como primer paso, se seleccionó parte de la finca Rivera Alta en Alcolea (Córdoba) (Tabla 2), como finca experimental de validación del sistema de seguimiento y control digitalizado. La parcela experimental consistió en 26 ha de olivos con dos variedades ‘Pical’ y ‘Nevadillo Azul’ (Figura 23 A). Todos los árboles de la finca experimental



**Fig. 23.** Mapa del sitio experimental con geolocalización de los árboles (A) de las dos variedades Pical (rojo) y Nevadillo azul (verde), zonas protegidas (B) y trampas (C) en la base de datos.

fueron geolocalizados y los datos introducidos a la base de datos. Otra capa añadida a la geodatabase es las zonas protegidas (embalse de agua) (Figura 23 B), estación meteorológica cercana, las trampas instaladas en el campo (Figura 23 C).

La geodatabase es actualizada de forma semestral mediante vistas de comprobación de la realidad del terreno.

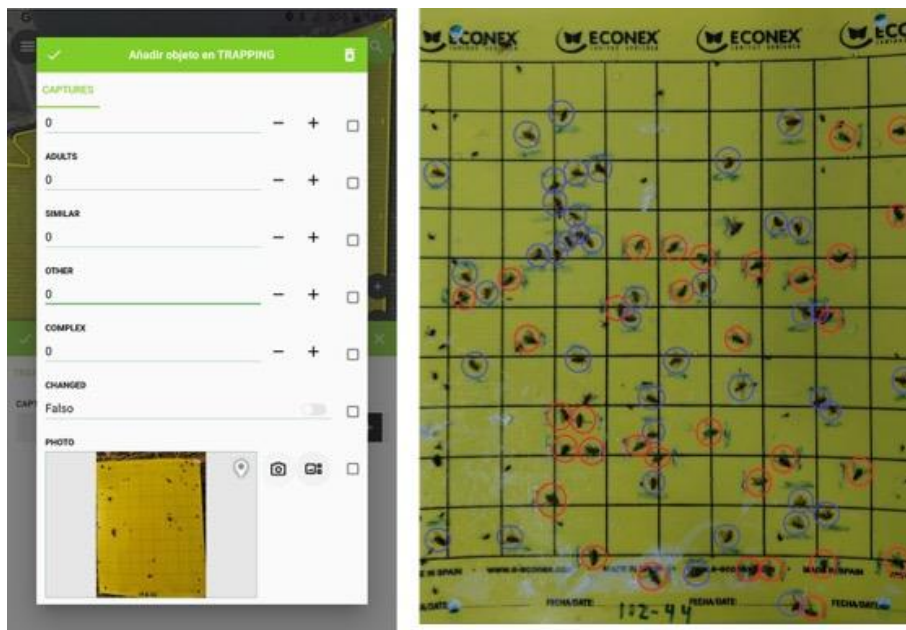
### 3.3.2. Diseño de la trampa semiautomática y los servicios electrónicos

Tras el ensamblaje de los componentes electrónicos, previamente indicados, y siguiendo el diseño impreso en 3D de la carcasa, se procedió a la instalación de 15 prototipos en la finca experimental de Alcolea (Córdoba) (Figura 24). Las trampas programadas para tomar dos fotos diarias y mandarlas al servidor donde se integran en la base de datos (Figura 28).



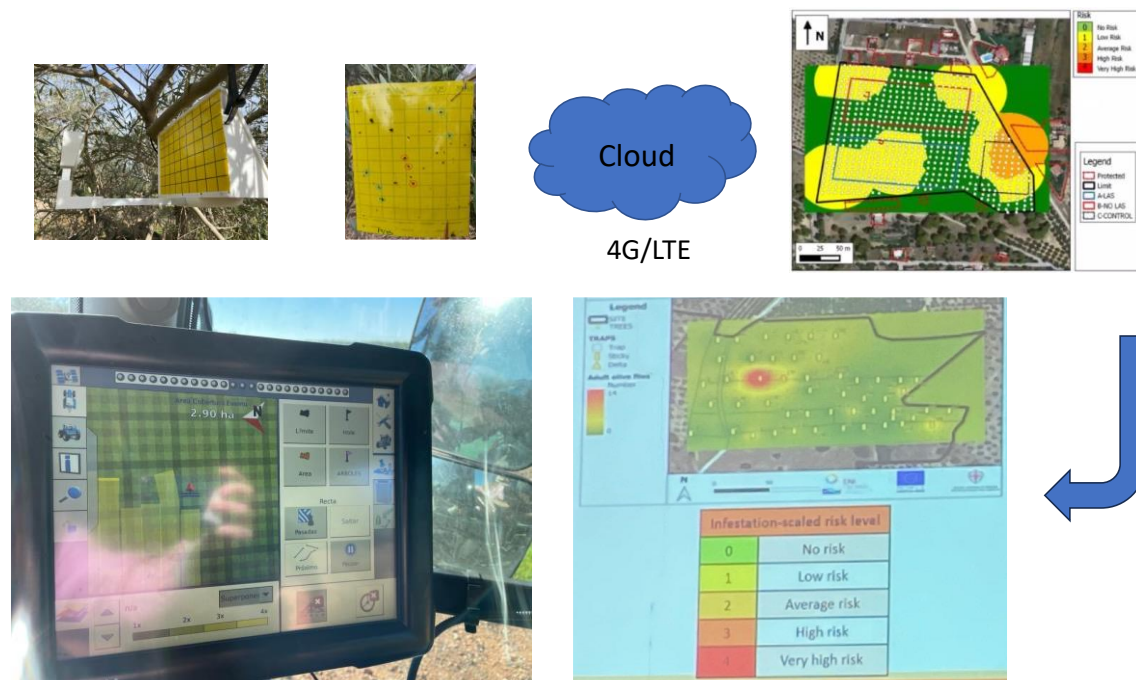
**Fig. 24.** Trampa electrónica autosuficiente funcionando en el campo.

Todas las fotos enviadas al servidor son atendidas por un entomólogo que procede a la comprobación, identificación de los insectos y anotación que consiste en etiquetar los adultos de la mosca del olivo diferenciando hembras y machos (Figura 25).



**Fig. 25.** Proceso de anotación de imágenes recibidas de las trampas electrónicas instaladas en el campo. Izquierda: interfaz Q-Field para la identificación, Derecha: Adultos de *B. oleae* identificados

Este proceso de anotación que conlleva a la identificación semiautomática de los adultos de la mosca del olivo en cientos de fotos recibidas del campo es parte integrante del aprendizaje de máquina cuya finalidad es desarrollar un algoritmo de reconocimiento automático de forma que la trampa sea capaz de autoidentificar a los adultos capturados y mandar su número a la base de datos, que a su vez genera los mapas de riesgo y los avisos de tratar. El conjunto de servicios electrónicos que proporciona el sistema incluye la generación de mapas de riesgo y la delimitación de zonas del tratamiento además de los avisos a tratar o no. En resumen, proporciona información de cuándo, dónde y como tratar (Figura 26).



**Fig. 26.** Generación de mapas de riesgo y guías de tratamiento basados en datos recibidos de las trampas automáticas instaladas en el campo.

El siguiente esquema representa los componentes y el funcionamiento del sistema de seguimiento de la mosca del olivo y el conjunto de servicios electrónicos que conlleva incluidos (Figura 27).





Fig. 27. Estructura del sistema digital desarrollado.

#### 4. Conclusiones

1. El formulado de la cepa EAMa 01/58-Su del HE *M. brunneum* es eficaz para el control de la mosca del olivo.
2. La eficacia del producto se ve aumentada cuando su aplicación se realiza en grandes áreas en comparación de resultados previos a nivel experimental, lo que hace esta técnica de control óptima para ser integrada en la guía de gestión integrada del cultivo con una aplicación anual durante otoño en áreas grandes como denominaciones de orígenes o aún más grande como toda Andalucía.
3. El sistema digital es eficaz y viable para hacer un seguimiento preciso y a tiempo real de las poblaciones de la mosca del olivo de forma remota sin necesidad de visitas técnicas semanales.
4. Los servicios electrónicos asociados al sistema digital de seguimiento hacen del sistema único en proporcionar guías de tratamientos al operador e indicar cuando, dónde y cómo tratar lo que reduce de forma significativa el coste del tratamiento y su impacto medioambiental.

## 5. Referencias bibliográficas

- Burrack et al. 2008. Comparison of olive fruit fly (*Bactrocera oleae* (Gmelin)) (Diptera: Tephritidae) captures in several commercial traps in California. *International Journal of Pest Management*, 54: 227-234.
- Donatelli et al. 2017. Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. *Agricultural Systems*, 155: 213-224.
- Fernández-Escobar et al. 2013. Evolution and sustainability of the olive production systems. In: Arcas N. et al (eds.). *Present and future of the Mediterranean olive sector*. Zaragoza: CIHEAM / IOC, 2013. p. 11-42.
- Garrido-Jurado, 2021. <https://sipcamcontigo.com/controlar-las-plagas-en-cultivos-con-nuevas-tecnologia/>
- Junta de Andalucía. 2012. *El olivar Andaluz*.
- King A 2017. The Future of Agriculture. *Nature*, 544: S21–S23.
- Malheiro et al. 2015. A review of *Bactrocera oleae* (Rossi) impact in olive products: From the tree to the table. *Trends in Food Science & Technology*, 44: 226-242.
- MAPA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 2021. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/>.
- Santiago-Álvarez, C. y Quesada-Moraga, E. 2007. The olive fruit fly. *Olea*. *FAO Olive Network*, 26: 60-61.