

# Agricultura de precisión y adopción a escala productiva

La agricultura de precisión (AP) ajusta las operaciones de cultivo y los insumos (enmiendas, fertilizantes, fitosanitarios, riego y bioestimulantes) a la variabilidad espacial de la parcela con el objetivo de disminuir los costes, incrementar los rendimientos y la sostenibilidad de las producciones.

La AP es un método virtuoso de mejora continuada donde la exactitud de la operación progresa a medida que se incrementan los ciclos ejecutados, gracias a la disposición creciente de datos obtenidos y gestionados con sistemas de alta capacidad de aprendizaje automático (*machine learning*) (figura 1).

Actualmente la AP se percibe como instrumento relevante para hacer frente a los retos globales asociados al régimen climático, los recursos hídricos, la contaminación y la degradación de los suelos agrícolas. No obstante, su adopción real a escala productiva es todavía incipiente o testimonial en muchos escenarios, siendo el proceso de adopción mucho más lento de lo que en los inicios se presumía.

## Gestión estratégica y gestión en tiempo real

Las bases de la AP fueron establecidas hace cuatro décadas por investigadores de las ciencias del suelo. Los primeros trabajos proceden de universidades norteamericanas, destacando los de Pierce *et al.* (1994) en los que se la asocia al manejo optimizado de los suelos, las plagas o el riego.

**Santiago Planas de Martí.**

Grupo de Investigación en Protección de Cultivos. Centro de Investigación en Agrotecnología. Agrotecnio. Universidad de Lleida.

Hace tres décadas que la agricultura de precisión inició su recorrido en Norteamérica, Australia y Europa. Su grado de adopción es muy dispar, dependiendo de la percepción del usuario final y de aspectos socioeconómicos que a su vez vienen determinados por la dimensión, los cultivos y la tipología de la explotación, el acceso a las tecnologías y la participación de personas debidamente formadas.



Los autores distinguen dos aproximaciones de la AP a la práctica real. La primera, denominada como gestión estratégica, utiliza mapas del suelo o de los cultivos para analizar la variabilidad espacial y establecer actuaciones diferenciadas en cada espacio de actuación. Es el caso, por ejemplo, de la distribución variable de fer-

tilizantes (*variable rate technology*, VRT) establecida en mapas de prescripción.

La segunda aproximación, denominada gestión en tiempo real, modula las actuaciones según la intensidad de un parámetro medido directamente en el transcurso de la operación. La estrategia es de elevado interés, por ejemplo, en prácticas

**FIG. 1** Fertilización variable de precisión basada en mapa de rendimientos e imagen satelital (Agrarium).



fitosanitarias como el tratamiento zonal o focal con herbicidas, requiriendo la detección simultánea de las malas hierbas a controlar.

### Principales ámbitos de empleo de la agricultura de precisión

En nuestro entorno productivo, el uso más extendido es la dosificación variable de fertilizantes a partir de mapas de rendimiento de la cosecha anterior en cereales de invierno y maíz. En ocasiones, los mapas de rendimiento son complementados con imágenes satelitales o mapas de parámetros del suelo (pH, materia orgánica y conductividad eléctrica) confeccionados mediante plataformas sensorizadas como las desarrolladas por Veris Technologies o la canadiense Dualem Inc. En estas circunstancias, en las que se dispone de doble información, la prescripción es mucho más precisa (**figura 1**).

Con estos procedimientos se maximiza el ahorro y se mitigan riesgos ambientales en fertilización, distribución de purines o estiércoles y siembra (ajuste de la dosis). Los beneficios se ven incrementados en parcelas de regadío tecnificado, en las que es factible controlar de forma precisa los volúmenes de agua aportada y, de esta forma, evitar la lixiviación de nutrientes y la consiguiente contaminación freática.

En las principales zonas de regadío vienen actuando con éxito contratistas de

operaciones de precisión como Fitasem, Agropixel y Agrarium. Sus servicios se extienden principalmente en las llanuras regadas de Lleida, Aragón y Navarra y en los viñedos de gran dimensión de las principales zonas vitícolas españolas.

Se benefician también de la AP otros cultivos como el tomate industrial en Extremadura o las plantaciones de almendro y el olivar intensivo en Andalucía. En estos casos, los mapas de características edáficas son utilizados en la elección diferenciada de portainjertos. Greenfield Technologies es una de las empresas de servicios de precisión destacada en este ámbito.

### Agricultura de precisión en protección de cultivos

En este ámbito la AP persigue potenciar la eficacia de las estrategias de control de las plagas, enfermedades y malas hierbas, siendo la detección precoz y la optimización de los tratamientos fitosanitarios los métodos más usuales. En el caso de los tratamientos químicos, la práctica se traduce en ajustar las dosis a las dimensiones del cultivo o en aplicar con carácter selectivo o proporcional (tratamientos variables).

El nivel de adopción final de las soluciones tecnológicas disponibles es muy dispar. En el tratamiento de cultivos arbóreos se encuentran a disposición tres sis-

temas para el cálculo de dosis ajustadas: Dosa3D (frutales, viñedo, cítricos, olivar y almendro), Dosaviña (viñedo) y Citrusvol (cítricos) y Dosaolivar (olivar), desarrollados por grupos de investigación de la Universidad de Lleida, Universidad Politécnica de Cataluña, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias y Universidad de Córdoba, respectivamente. Estas cuestiones han sido objeto de análisis previo (Planas, 2018).

De otra parte, nuestro país ha sido pionero en la validación de sistemas inteligentes mediante sensores (ultrasonidos y lidar), para el ajuste de la dosis en tiempo real, en función de la dimensión de la vegetación a tratar. La metodología empleada por dichos sistemas comporta las fases sucesivas de detección, cálculo, decisión y actuación sobre el caudal de las boquillas del pulverizador.

Igualmente, los grupos de investigación mencionados, en estrecha colaboración con la industria de maquinaria agrícola, han sido partícipes del desarrollo inicial de los dispositivos necesarios para la práctica de los tratamientos variables en los distintos cultivos arbóreos.

Los inicios de este proceso se sitúan, hace más de dos décadas, en los trabajos del proyecto de investigación Pulvexact. Cabe destacar también la importante contribución del fabricante Pulverizadores Fede, primera empresa que implementa y comercializa estos sistemas de control en España.

### Sistemas avanzados de dosificación variable

Nuevos trabajos de mejora de dichos sistemas, que utilizan componentes más avanzados para la detección, decisión y actuación, se vienen realizando en otros países. Destacan especialmente los trabajos aportados por la Universidad de Ohio (EE.UU), pionera en la implantación de boquillas pulsantes PWM (*pulse-wid-*

th modulation) sobre pulverizadores para cultivos arbóreos, lo que permite mayor precisión y menor tiempo de respuesta en relación las válvulas proporcionales utilizadas hasta el momento en pulverización variable.

Los primeros tratamientos zonales, en base a mapas de prescripción (gestión estratégica) fueron ejecutados en 2017 en viñedos de Raimat (Lleida) como parte de los trabajos del Grupo Operativo Phytovid. En tratamientos para el control del ácaro amarillo (*Eotetranychus carpini*), la dosis fue ajustada en función del vigor de las vides a partir de imágenes Sentinel II previamente procesadas y mapeadas (Román *et al.*, 2021).

En todos los casos, los distintos sistemas se muestran efectivos, permitiendo reducir las dosis en proporciones relevantes. Los beneficios potenciales, de carácter económico, ambiental y personal (operarios, residentes y transeúntes), parecen pues evidentes, encontrándose totalmente en línea con la vigente estrategia europea destinada a reducir drásticamente el empleo de los fitosanitarios.

### Barreras a la práctica de tratamientos a dosis ajustada

No obstante, la realidad muestra que la incorporación a escala productiva (adopción) se sitúa muy por debajo de las expectativas iniciales. Los motivos del desfase pueden atribuirse a:

1. Incompleta evaluación de estas técnicas a nivel biológico (eficacia) en distintos escenarios y ausencia de criterios del regulador (autoridades sanitarias) sobre dosis admisibles y número máximo de tratamientos anuales en tratamientos zonales o focales.
2. Reticencia del productor al empleo de dosis inferiores a las establecidas debido al temor a que se produzcan pérdidas de producción. De forma técnicamente injustificada, la gravedad de las



Foto 1. Sistema See and Spray™ incorporando cámaras de detección y boquillas de actuación individual (John Deere)<sup>2</sup>.

- plagas conduce a mantener (incluso a incrementar) las dosis, eludiendo cualquier ahorro de producto fitosanitario.
3. La operativa de los dispositivos de precisión en escenarios agrícolas no es siempre lo suficientemente robusta. Los sistemas de control electrónico presentan incidencias frecuentes no siempre resueltas fácilmente. En protección sanitaria, la oportunidad de las operaciones es crítica, por lo que la disponibilidad de los equipos debe ser máxima.
  4. La disponibilidad de especialistas en estas técnicas y de servicios de atención post-venta es todavía muy limitada.

### Control herbicida de precisión

Los tratamientos herbicidas focales de cultivos bajos han seguido también una tendencia ralentizada. Los sistemas de detección y tratamiento individualizado en tiempo real (*see and spray*) se encuentran disponibles desde hace también un par de décadas. Posibilitan ahorros de producto muy cuantiosos en relación al tratamiento general de la parcela en parcelas de cultivo extensivo. De entre los sistemas comercializados destacan Weedseeker-2 (Trimble Agriculture), Amaspot (Amazone), See and Spray (John Deere) (foto 1).

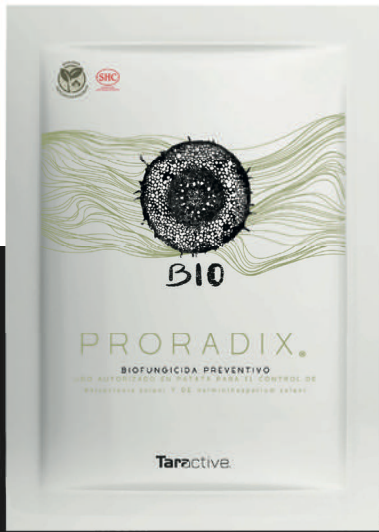
El nivel de adopción no es el que inicialmente se preveía. Nuevamente, la reticencia de quienes toman las decisiones sanitarias, y las dificultades indicadas anteriormente para el caso de los cultivos arbóreos, hacen que, en muchos casos, prevalezca el tratamiento tradicional sobre la totalidad de la parcela.

### Dosis fitosanitaria variable en cultivos bajos, un caso de éxito

Los tratamientos de precisión con boquillas pulsantes (PWM), instaladas sobre pulverizadores de barra de gran dimensión, mantienen una trayectoria creciente en la Europa cerealista y en los grandes cultivos de Norteamérica. Se trata de un sistema de dosificación altamente preciso de manera que asociando el sistema de navegación se consigue uniformizar la dosis, eliminar irregularidades en los giros, solapamientos y zonas no tratadas.

El control se ejerce por sectores de la barra y a nivel individual de las boquillas, modulando el caudal mediante la variación de la frecuencia de las pulsaciones y obligando al cierre automático en los límites de la zona de tratamiento. Dynajet (Teejet Technologies) y ExactApply (John Deere), StrictSpray (Agrifac)<sup>1</sup> son ejemplos destacados en este ámbito tecnológico (figura 2).





# PRORADIX®

Pseudomonas sp. (cepa DSMZ 13134)

## BIOFUNGICIDA PREVENTIVO

TRATAMIENTO QUÍMICO



PRORADIX®



LA ÚNICA Y PRIMERA  
PSEUDOMONA  
REGISTRADA PARA  
HORTÍCOLAS

TU SOLUCIÓN  
BIOLÓGICA A LOS  
PROBLEMAS DE  
HONGOS PATÓGENOS  
DEL SUELO CON  
EFECTO  
BIOESTIMULANTE

EFICACIA PROBADA Y  
CONTRASTADA  
SUPERIOR AL **90%**

Caso de éxito en fresa variedad fortuna.

\*Imágenes tomadas el mismo día. Campaña 21-22

La combinación perfecta:

pH  
4,2  
pH ÁCIDO

BIOESTIMULANTE  
ORGÁNICO NATURAL  
SIN TRATAMIENTO  
QUÍMICO



▶ Escanéame!



+



TARAVERT  
KING KONG®

🐾 Bioestimulante 4.0

Prepara tu suelo con la  
mejor materia orgánica y  
asegura el mejor  
funcionamiento de Proradix®



[www.tarazonaagrosolutions.com](http://www.tarazonaagrosolutions.com)

**Tarazona** AGROSOLUTIONS

Disponemos también, aunque por el momento con una adopción menor, de sistemas de control automatizado, también asociados a la navegación, basados en mapas de prescripción disponibles en pulverizadores de barras dotados de boquillas con control. Este es el caso, por ejemplo, de Multispray (Kuhn), Varioselect (Lechler) y Selectron (Arag).

## Drones y tratamientos de precisión

Los trabajos del Grupo Operativo Phytodron han evidenciado el interés potencial de estos equipos en aquellas circunstancias en las que los medios terrestres no son aptos. El caso más significado es el de los cultivos en pendiente pronunciadas y parcelas de difícil acceso (**foto 2**).

Además, el dron permite tratar el momento oportuno y con celeridad. No está condicionado por la trafabilidad del suelo y se muestra especialmente útil en períodos prolongados de lluvia tras los que es urgente tratar.

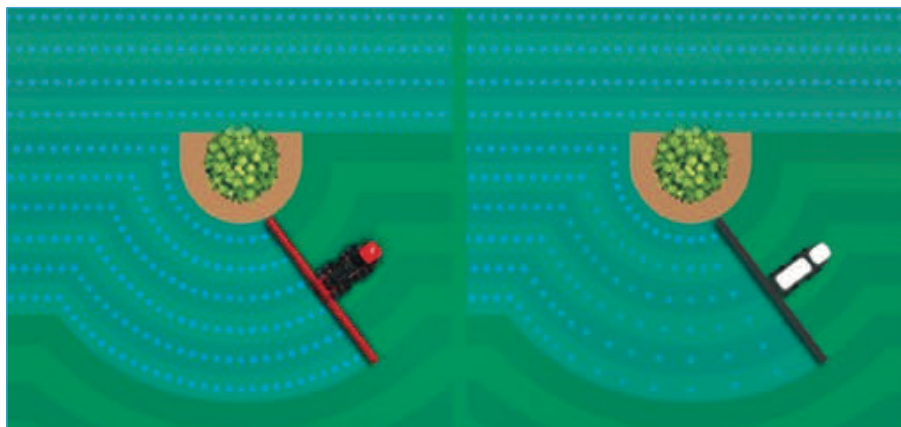
No obstante, el dron destaca por su aptitud para los tratamientos de precisión y su potencial de deriva es sensiblemente menor al de los pulverizadores asistidos por aire, lo que permite reducir la anchura de las bandas de seguridad respecto a las zonas habitadas y espacios sensibles.

El empleo normalizado del dron está pendiente de la puesta al día de la normativa nacional y europea. Alemania y Suiza, y próximamente lo hará Francia, han modificado el marco regulatorio admitiendo tratamientos en circunstancias específicas.

## La paradoja de la dosis

Existen algunas implicaciones de los tratamientos de precisión sobre el procedimiento de autorización de sustancias activas y productos fitosanitarios debido a que las dosis efectivas son sensiblemente o notablemente inferiores a las estableci-

**FIG. 2** Compensación en giro PWM (izquierda) frente a pulverización constante (derecha) (Agrifac).



das para los tratamientos convencionales.

En el caso de los tratamientos de precisión, las dosis estándar deben ser revisadas y, en su lugar, deben establecerse valores flexibles, inferiores a los límites máximos de los tratamientos convencionales. Asimismo, en algunos casos podría revisarse el número de tratamientos anuales admitidos, habida cuenta de que la pulverización focal o zonal no afecta la totalidad de la parcela y, tal vez, sobre los espacios no tratados cabría una segunda aplicación selectiva. Menores dosis significan menores riesgos personales y ambientales.

Estos importantes aspectos han sido estudiados, entre otros, por Van Boheemen *et al.* (2022) e Isemer *et al.* (2023) y son objeto de consideración por parte del grupo ad-hoc ISO TC23/SC6 AHG2 *Definitions and test methods for new precision application technologies*.

## Irrupción de la robótica

Aunque de momento los intentos no rebasan el ámbito de la I+D, son destacables algunos avances en la protección autónoma de cultivos, incluyendo el monitoreo de cultivos, la detección de plagas y los tratamientos selectivos por vía terrestre o aérea (dron).

De hecho, ya vienen operando hace casi un lustro los pulverizadores autóno-

mos para plantaciones frutales y viñedos fabricados por la firma californiana GUSS. También, el fabricante brasileño Jacto ha presentado un equipo con capacidades similares. Por su parte, la firma francesa VitiBot está iniciando la comercialización de un modelo robotizado adaptado a viñedos de baja densidad foliar.

Finalmente, varios constructores de tractores disponen de plataformas con capacidad de operar autónomamente. Destaca entre ellos el vehículo desarrollado por la sociedad holandesa AgXeed, en cooperación con la alemana Claas, orientado inicialmente a labores de precisión en cultivos de cereales y forrajes. Recientemente ha aparecido la versión para tratamientos de plantaciones, AgBot, construido en colaboración con Hot Spraying Systems (**figura 3**).

## Riego de precisión

La práctica del riego de precisión, factible en instalaciones digitalizadas, trata de gestionar estratégicamente la variabilidad del suelo, afectando la capacidad de retención hídrica, debida a las alteraciones en la densidad aparente, la compactación y el micro relieve.

La gestión diferencial del riego requiere de la sectorización de las instalaciones, basándose en imágenes remotas y el análisis granulométrico (textura) del suelo.

Esta metodología empieza a ser realidad en España en explotaciones de gran y media dimensión. La empresa más destacada en este ámbito es Valmont Industries (Valley Irrigation), con dilatada experiencia en sistemas de aspersión y tecnología *variable rate irrigation* (VRI).

Otro avance importante se centra en la estimación de las necesidades de riego. Empresas como Terraview emplean la teledetección remota (Sentinel II y III) y el aprendizaje automático para confeccionar mapas predictivos de humedad, a 50 cm de profundidad, en diferentes tipos de suelo (sondas virtuales). Esta metodología, aún en sus prolegómenos, viene aplicándose en viñedos de gran formato en California, Australia, España (La Mancha) y Francia, siendo previsible su utilización en otros cultivos.

También empresas como Sistemas Electrónicos Progres, en asociación con la tecnológica Vegga, dedican importantes esfuerzos a establecer recomendaciones de riego muy precisas gracias a la combinación de la información de sensores del suelo, posicionados previo estudio de la variabilidad, con imágenes de satélite o dron y los datos meteorológicos.

Por su carácter innovador, entre las líneas de desarrollo actual destacan los trabajos del IRTA en modelización virtual de las condiciones de las parcelas regadas mediante gemelos digitales para mejorar la toma de decisiones.

Empresas vitícolas como Codorníu en Raimat, los productores de manzana de Girona (GiroReg) y el promotor del cultivo de almendro Iberian Smart Financial Agro, entre otras, son ejemplos destacados de la implantación del riego de precisión en España.

El riego de precisión también se está mostrando útil en la distribución variable de purines distribuidos a través de las conducciones de riego a presión. El tema alcanza el máximo interés en zonas regadas vulnerables en las que las que deben



Foto 2. Dron fitosanitario operando en los ensayos de evaluación realizados por el Grupo Operativo Phytodron en Raimat (Planas, 2022).

aplicarse restricciones para la protección de los acuíferos frente a la infiltración de agentes contaminantes.

### Estados Unidos y Europa, diferencias en la adopción

Referirse a los inicios de AP en Estados Unidos es retroceder cerca de cinco décadas, hasta la conceptualización de la gestión espacial diferencial en las universidades del *Midwest* y el inicio de los servicios de empresas especializadas.

En la década posterior, la de los 90, aparecen en Europa los primeros servicios AP del consorcio espacial EADS (constructor de Airbus) en Toulouse (FR). Se trata imágenes satelitales procesadas para gestionar la fertilización y la siembra en cereales de invierno y maíz. En época similar, la química alemana Yara embarca el primer sistema de sensores IR para la fertilización nitrogenada de precisión en cereales y en los viñedos de Raimat se realizan pruebas de monitoreo de la vendimia y, poco después, de vendimia selectiva en base a imágenes remotas caracterizando el vigor del cultivo (Arnó *et al.*, 2014).

Hoy en día, en Norteamérica y en Europa conviven múltiples agentes que conforman la cadena de valor, desde el desarrollo de sensores y el procesado de la información hasta la prestación de servicios agronómicos integrales.

Los factores que influyen en el proceso de adopción son similares en la agricultura europea y norteamericana. Destacan en primer lugar la dimensión de la explotación, la topografía, las condiciones edáficas, el tipo de cultivo y los costes de implementación, factores todos determinantes del beneficio marginal que pueda generarse con la incorporación de las tecnologías AP.

Otro factor determinante lo constituye el umbral de riesgos asumido por parte del usuario final. En él confluyen diferentes elementos como la facilidad en la contratación de los servicios, la existencia de una red de asistencia especializada para el mantenimiento y la sustitución de equipos. El nivel de formación de los usuarios finales y las condiciones socioeconómicas del entorno también afectan al proceso de adopción.

El grado de adopción de las tecnologías AP en Europa y Estados Unidos se asemeja cada vez más. Sobre el tema, puede consultarse los artículos de Massi *et al.* (2022), Fiocco *et al.* (2023), Pavlenko *et al.* (2023) y el informe del USDA (McFadden *et al.*, 2023). Esta información y la procedente de otros trabajos similares se ha resumido a continuación:

#### Sistemas de autoguiado:

- EE.UU: la mayor parte de la superficie cultivada se gestiona con vehículos de auto conducción, superando con creces el 60% de la superficie de sorgo y algodón.



- UE: adopción inferior, debido a la menor dimensión de las explotaciones y la prevalencia en ciertas áreas de la hortofruticultura o los forrajes.

#### GNSS:

- EE.UU: el guiado satelital es utilizado en más del 40% de las explotaciones.
- UE: adopción inferior, debido a la menor dimensión de las explotaciones y la prevalencia en ciertas áreas de la hortofruticultura o los forrajes.

#### Mapeo satelital de suelos y aplicación variable de fertilizantes:

- EE.UU: Más de la mitad de las explotaciones de dimensión pequeña y mediana utilizan mapas de rendimiento, mapas de suelos, aplicación variable (VRT) y sistemas de guiado.
- UE: España es un destacado usuario en grandes explotaciones. Contrariamente, la tecnología VRT en fertilización se encuentra retrasada en explotaciones de menor dimensión. Últimamente, Francia ha experimentado una regresión de la superficie monitoreada remotamente.

#### Monitoreo del cultivo:

- EE.UU: preferencia por el monitoreo de rendimientos para la prescripción de las dosis de inputs y del grado de humedad en cosecha de grano (trigo y maíz). En Alemania, son tendencia la predicción de rendimientos, la detección de enfermedades y el mapeo de la variabilidad estacional.
- UE: en España, es tendencia creciente la generación de mapas de riego en maíz y viña. En Francia, el mapeo de viñas para gestionar el vigor.

#### Aplicación variable en cultivos arbóreos:

- EE.UU: tendencia en grandes plantaciones de almendro y viñedos californianos.
- UE: incipiente, solo en empresas innovadoras.

#### Vehículos autónomos y robótica:

- EE.UU: en expansión en gran cultivo y tratamientos de plantaciones.

**FIG. 3** Vehículo autónomo adaptado a la pulverización de plantaciones AgBot (H.S.S. & AgXeed)<sup>3</sup>.



- UE: En expansión en cultivos de alto valor en invernadero y expectante en cultivos arbóreos.
- Drones para tratamientos zonales:**
- EE.UU: uso frecuente en gran cultivo.
  - UE: no autorizados.

#### A modo de conclusión

La AP se está expandiendo en el mundo, pero no a la velocidad que se preconizaba inicialmente. Se sitúa preferentemente en países avanzados, en empresas con elevados rendimientos, de estructura, dimensión parcelaria y cultivos adecuados, gestionadas por agricultores con determinado perfil socioeconómico (no reticentes).

En nuestro entorno próximo, las mejores candidatas son las empresas cerealistas y forrajeras de gran dimensión, en zonas regadas. Las de menor dimensión y las dedicadas a la horticultura o la arboricultura no son por el momento buenas candidatas.

La percepción ex-ante de los usuarios y los factores económicos (beneficio potencial) son determinantes. También influye la accesibilidad a la tecnología, fre-

cuentemente muy limitada por la debilidad de las redes de asistencia, la falta de personal especializado y los déficits formativos del sector. En nuestro país, penaliza también la obsolescencia de buena parte del parque de máquinas.

La incorporación de servicios AP ha de verse favorecida por las ayudas destinadas a fomentar la aplicación de la agricultura y la ganadería de precisión y tecnologías 4.0, en el marco de los proyectos Perte cofinanciados por el Fondo Europeo Next Generation. Sin duda alguna, los cambios estructurales en la agricultura, tendentes a incrementar la dimensión de las explotaciones, actuarán también como dinamizador. ■

#### NOTAS DEL AUTOR

- 1 <https://www.agrifac.com/sustainable-farming/pulse-width-modulation-pwm-spraying/>
- 2 <https://www.deere.es/es/nuestra-compa%C3%B1a/nuestros-medios-de-comunicaci%C3%B3n/notas-de-prensa/2022/see-and-spray-llega-a-Europa.html>
- 3 <https://holspraying.com/event/h-s-s-agxeed-demo-tour-21-10/>

#### BIBLIOGRAFÍA

Existe una amplia bibliografía a disposición de los lectores en el correo [redaccion@eumedia.es](mailto:redaccion@eumedia.es)

 **HEROGRAMA**<sup>®</sup>  
ESPECIALES



eco



TOTEM

  
HEROGRAMA<sup>®</sup>  
ESPECIALES

POTENCIA LA RAÍZ DE TU CULTIVO

POWERED BY **HEROGRAMA GROUP**

