

Soluciones de agricultura de precisión para el control de malas hierbas en maíz

Tecnología y conocimientos agronómicos a partes iguales en el contexto de la agricultura de precisión

El cultivo del maíz es, junto con la remolacha, el cultivo extensivo más tecnificado que podemos encontrar en los principales sistemas de regadío en España. La introducción de las primeras variedades híbridas, con el incremento del potencial de rendimiento que supuso y la respuesta a la fertilización nitrogenada, ha incrementado el rendimiento medio del maíz de alrededor de 2.000 kg/ha hasta picos de más de 18.000 kg/ha en parcelas con riego por aspersión bien manejadas. Este incremento en la productividad ha venido asociado, principalmente, a la mejora varietal, al incremento de la fertilización, al manejo de la densidad de siembra y al mejor control de las malas hierbas (Cardwell, 1982). Además, es mucho mayor que el incremento de rendimiento observado en otros cultivos como el trigo.

Esta alta respuesta al uso de insumos en el rendimiento ha ocasionado, en algunos casos, una sobreaplicación de estos con el fin de intentar asegurar la máxima producción. Sin embargo, esto ha causado problemas de contaminación de aguas subterráneas por exceso de nitratos y también de algunas materias activas herbicidas. De hecho, las regulaciones ambientales en los últimos años están disminuyendo las cantidades autorizadas a aplicar de

J.M. Montull¹, J.M. Llenes², J.A. Martínez-Casasnovas³, A. Escolà³.

¹ Grupo de Investigación en Malherbología y Ecología Vegetal. Agrotecnio-CERCA Center Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria Universitat de Lleida, Lleida.

² Unitat de Malherbologia del Servei de Sanitat Vegetal, DARP, Generalitat de Catalunya, Lleida.

³ Grupo de Investigación en AgróTICA y Agricultura de Precisión. Agrotecnio-CERCA Center Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria Universitat de Lleida, Lleida.

Durante los últimos años se vienen desarrollando diferentes trabajos con el objetivo de integrar nuevas tecnologías en el control de las malas hierbas del maíz que nos permitan mantener los rendimientos con una menor cantidad de insumos, haciendo que su producción sea más eficiente y sostenible. En este artículo se detallan algunos de los avances surgidos de dichos trabajos.



algunos de estos insumos por este motivo junto al hecho de que en algunas ocasiones las aplicaciones no se realizan adecuadamente en tiempo y forma.

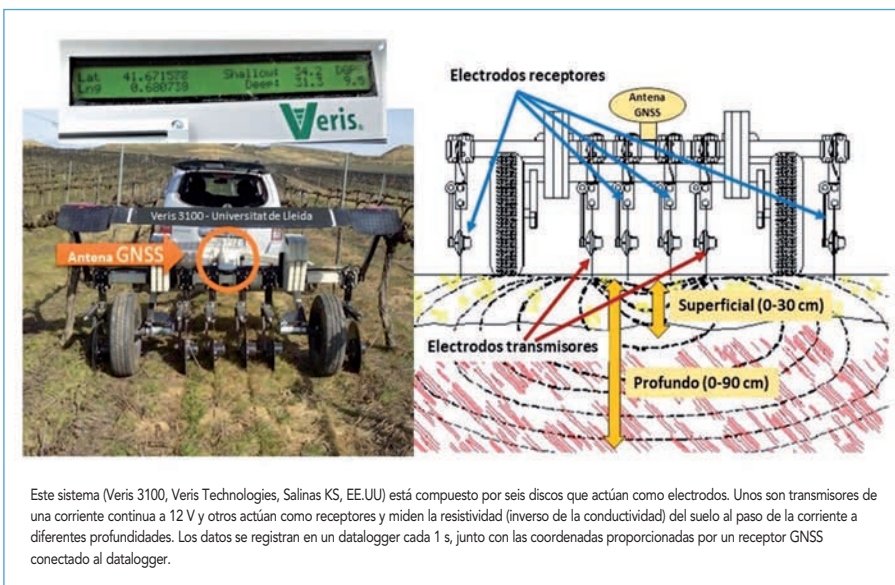
En el caso concreto de los herbicidas, algunos de los históricamente utilizados, como la atrazina y el alacloro, se prohibieron durante la década de los 90 por contaminación de aguas subterráneas y algunos de los utilizados a día de hoy, como la terbutilazina, no se pueden aplicar más que un año de cada tres. El uso de herbicidas en maíz es común dado que las malas hierbas que potencialmente lo afectan tienen una capacidad competitiva elevada y crecen en condiciones ideales de temperatura, irrigación y nutrición. Por esto, se utilizan mezclas de ingredientes activos para conseguir un espectro de control y eficacia suficientes.

Generalmente, los herbicidas se aplican de manera uniforme en la parcela (dosis única aplicada uniformemente en toda la superficie), utilizando recomendaciones a nivel de comarca agrícola y sin entrar en la flora realmente presente en la parcela. Esto es así porque la mayor parte de ingredientes activos que controlan gramíneas anuales se deben aplicar en pre-emergencia o postemergencia muy precoz de las malas hierbas para ser realmente efectivos.

Además, debemos tener en cuenta otros condicionantes:

- La eficacia de los diferentes ingredientes activos depende de la especie a controlar.
- Existe variabilidad tanto inter como intraparcelsaria en la distribución espacial de las diferentes especies de malas hierbas.
- La eficacia de los herbicidas de absorción radicular se ve afectada por la humedad, la cantidad de arcilla y materia orgánica del suelo. Para estas dos últimas, su distribución espacial puede presentar variaciones importantes en la misma parcela.

FIG. 1 Ejemplo de sensor de contacto galvánico para la medida de la CEa en continuo.



Este sistema (Veris 3100, Veris Technologies, Salinas KS, EE.UU) está compuesto por seis discos que actúan como electrodos. Unos son transmisores de una corriente continua a 12 V y otros actúan como receptores y miden la resistividad (inverso de la conductividad) del suelo al paso de la corriente a diferentes profundidades. Los datos se registran en un datalogger cada 1 s, junto con las coordenadas proporcionadas por un receptor GNSS conectado al datalogger.

Esta limitación en el tiempo disponible para el tratamiento con algunos herbicidas condiciona la toma de decisiones y dificulta la detección e identificación adecuada de las especies de forma que se puedan adoptar técnicas de agricultura de precisión para el control de las malas hierbas en este cultivo.

Es por esto que durante los últimos años se vienen desarrollando diferentes trabajos con el objetivo de integrar nuevas tecnologías en el control de las malas hierbas del maíz que nos permitan mantener los rendimientos con una menor cantidad de insumos, haciendo que su producción sea más eficiente y sostenible.

Toma de decisiones en relación a la flora

A diferencia de la aplicación de otros insumos, en el caso del control de las malas hierbas tenemos varios aspectos por resolver:

- No se conoce la eficacia de todos los ingredientes activos frente a todas las especies.

- La eficacia depende de la especie así como de la dosis y de las condiciones del tratamiento.
- Todas las especies no emergen al mismo tiempo.

Para dar respuesta a esta incertidumbre y hacer una mejor elección de ingredientes activos y dosis se desarrolló el sistema de ayuda a la decisión (*Decision Support System* o *DSS* en inglés) *IPMwise* (Montull, Taberner, Bøjer, & Rydahl, 2020). Este sistema permite ajustar las recomendaciones de herbicidas a las condiciones reales de la parcela. En su desarrollo, desde el año 2009, se comprobó que ajustar las recomendaciones de herbicidas a la flora realmente presente en la parcela permitía reducir el coste e impacto ambiental del tratamiento entre un 20% y un 50%. Además, *IPMwise* está diseñado para integrar información relativa a las condiciones de tratamiento para cada parcela. Este concepto se conoce como *field-specific*, en inglés, en contraposición con las aplicaciones variables o localizadas dentro de la parcela, que se conocen como *site-specific*.

Conocer la variabilidad de los suelos

En el caso de herbicidas de absorción radicular, es importante conocer la textura del suelo y el contenido de materia orgánica, así como su distribución espacial y variabilidad dentro de la parcela. A día de hoy hay diferentes sensores que nos permiten mapear la variabilidad intraparcelaria de estos parámetros.

Ya en la etiqueta de algunos herbicidas se expresa la dosis a aplicar según el tipo de suelo y la cantidad de materia orgánica. En general, suelos ligeros y pobres en materia orgánica requieren menos dosis para alcanzar la misma eficacia que suelos pesados. Esta variación en la dosis depende también del ingrediente activo.

La aplicación variable de estos insumos nos permite limitar el riesgo de contaminación de aguas dado que en suelos ligeros, donde el riesgo es mayor, ajustamos la dosis a la baja manteniendo la eficacia.

A día de hoy, y dentro del ámbito de las técnicas y tecnologías de la agricultura de precisión, hay diferentes sensores que nos permiten estimar la variabilidad intraparcelaria de propiedades de los suelos. Un ejemplo de estos sensores es los que miden la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa). Estos sensores se utilizan cada vez más para comprender y evaluar cómo varía espacialmente el suelo, y también para definir zonas de manejo diferenciado en parcelas agrícolas, tanto en cultivos extensivos como en plantaciones frutícolas. Como la CEa varía en una escala espacial similar a la de muchas propiedades físico-químicas del suelo, esta tecnología está siendo ampliamente aceptada y utilizada. Específicamente, se han documentado buenas correlaciones con la salinidad del suelo, la capacidad de retención de agua y la textura del suelo, o incluso con el contenido de carbono orgánico, la capacidad de intercambio catiónico, la pro-

FIG. 2 Correspondencia aproximada entre la conductividad eléctrica aparente del suelo y la abundancia en el suelo de las diferentes fracciones texturales y/o salinidad. Fuente: adaptado de Lund et al. (1999).

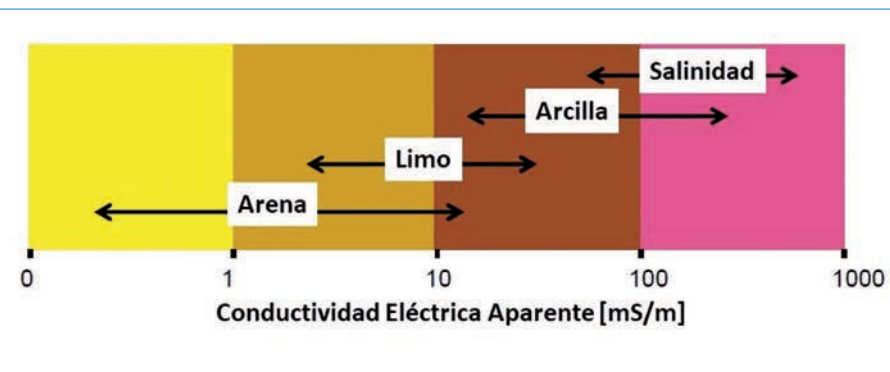
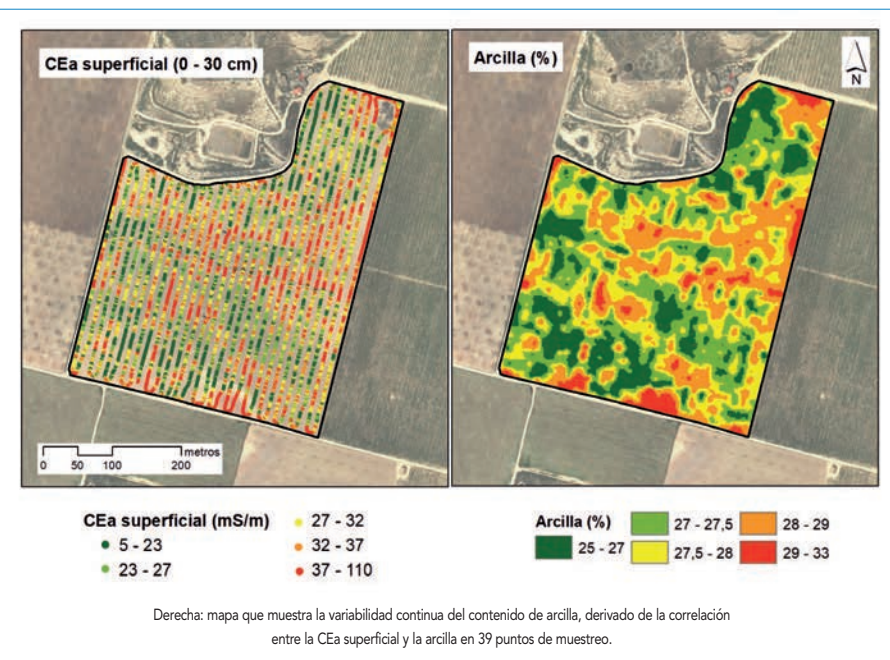


FIG. 3 Izquierda: mapa con los puntos de muestreo de CEa superficial adquiridos por el sensor Veris 3100 en una parcela de 14 ha.



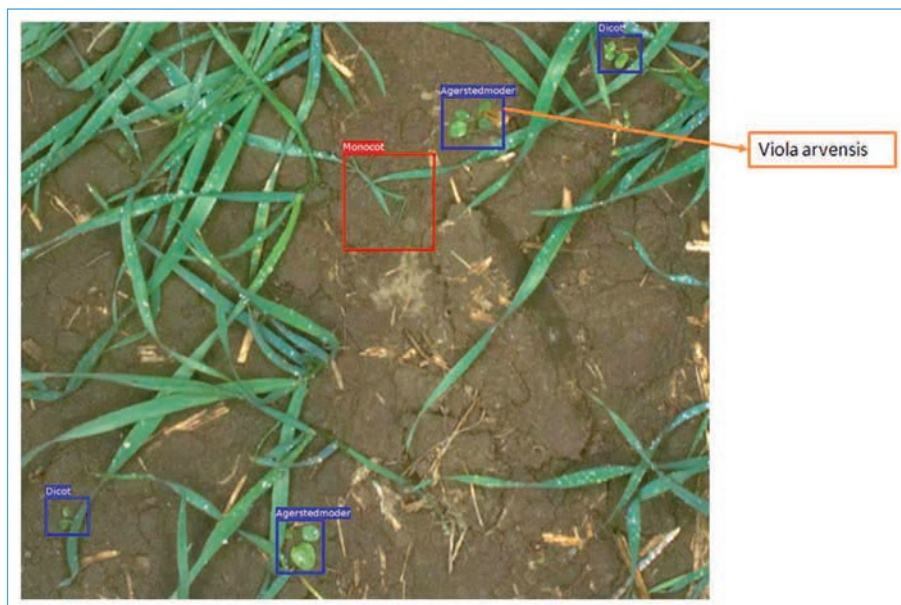
fundidad del suelo, entre otras propiedades (Martínez-Casasnovas et al., 2022).

Los sensores existentes para medir la CEa en continuo se diferencian según el método utilizado para introducir o inducir una corriente eléctrica en el suelo: contacto galvánico directo (figura 1), o por inducción electromagnética. La CEa se mide en

siemens por metro (S/m), aunque en el caso de este tipo de medidores, y debido a la magnitud de la corriente inyectada y medida, la unidad más habitual son los milisiemens por metro (mS/m).

Las relaciones entre la CEa y las propiedades de los suelos son complejas y no existe una correspondencia exacta entre

FIG. 4 Captura de pantalla del sistema RoboWeedMaps que realiza la identificación y localización de las diferentes especies en una parcela de trigo (Rydahl *et al.*, 2022).



la CEa y el contenido de sales, la textura u otras propiedades. A pesar de eso, autores como Lund *et al.* (1999) han llegado a establecer una correspondencia aproximada, como la que se muestra en la **figura 2**. Las arcillas pesadas, con alto contacto entre partículas y alta capacidad de retención de humedad, son altamente conductoras. Las arenas gruesas, con contacto limitado entre partículas y baja capacidad de retención de humedad, son malos conductores. En suelos salinos, la respuesta de la CEa viene condicionada por la presencia de sales disueltas en el agua de los poros del suelo.

A partir de los datos de CEa, y estableciendo correlaciones con resultados analíticos de textura en puntos de muestreo de las parcelas, se pueden llegar a obtener mapas de la variabilidad de las fracciones texturales en la parcela, tal como se muestra en la **figura 3**.

También se están empezando a comercializar en nuestro país sensores montados en sembradoras que permiten esti-

“

Es imprescindible conocer las parcelas e incluir la agronomía en la toma de decisiones. No se puede hacer agricultura de precisión desde la oficina y el uso de tecnología no es garantía de éxito per se

mar el contenido de materia orgánica del suelo en tiempo real durante la siembra para ajustar la dosis de semilla. Esta medición se hace de forma indirecta, a partir de sensores ópticos que miden la reflectancia del suelo. Los suelos más oscuros contienen más humedad o materia orgánica que los suelos más claros. En base a esto, los sensores de luz en el espectro visible e infrarrojo cercano, sirven para aproximar el contenido de materia orgánica del suelo

(Sudduth *et al.*, 1993). La materia orgánica es un factor importante ya que, entre otros, afecta a la retención de los herbicidas aplicados al suelo. Un ejemplo de esta tecnología es el sensor OpticMapper (Veris Technologies, Salinas KS, EE.UU).

Todas estas tecnologías, que nos proporcionan mapas de textura y porcentaje de materia orgánica del suelo, no solo tienen interés para optimizar la fertilización y el riego sino que, además, nos permiten la dosificación variable de herbicidas de pre-emergencia.

Detección automática de malas hierbas

Existen diversos equipos comerciales que realizan una detección automática de malas hierbas para generar mapas de infestación o bien para hacer aplicaciones de herbicida de forma localizada en tiempo real. Estos equipos utilizan diferentes algoritmos tradicionales de segmentación o incluso otros basados en inteligencia artificial para distinguir entre malas hierbas y cultivo. Hasta la fecha, la principal limitación de estos sistemas es que no son capaces de distinguir entre especies de malas hierbas y, por tanto, no puede aplicar automáticamente el ingrediente activo más adecuado en cada caso. A modo de ejemplo, para alcanzar un 97% de eficacia sobre *Abutilon theophrasti*, podemos utilizar 0,92 l/ha de fluroxipir 20% y, sin embargo, este tratamiento solo tendría un 45% de eficacia sobre *Chenopodium album*. Así, este tipo de equipos exige, de forma previa, visitar el campo y así elegir la mezcla más adecuada de materias activas para la flora realmente presente.

Existen otros avances basados en la toma de imágenes RGB o multispectrales previa al tratamiento. Esto permite, utilizando algoritmos de reconocimiento automático de imágenes, llegar a identificar las diferentes especies presentes y poder generar mapas de prescripción a dosifica-

FIG. 5 Mapa de prescripción a dosis variable en un sistema de información geográfica preparado para exportar al pulverizador de aplicación variable (Rydahl et al., 2022).

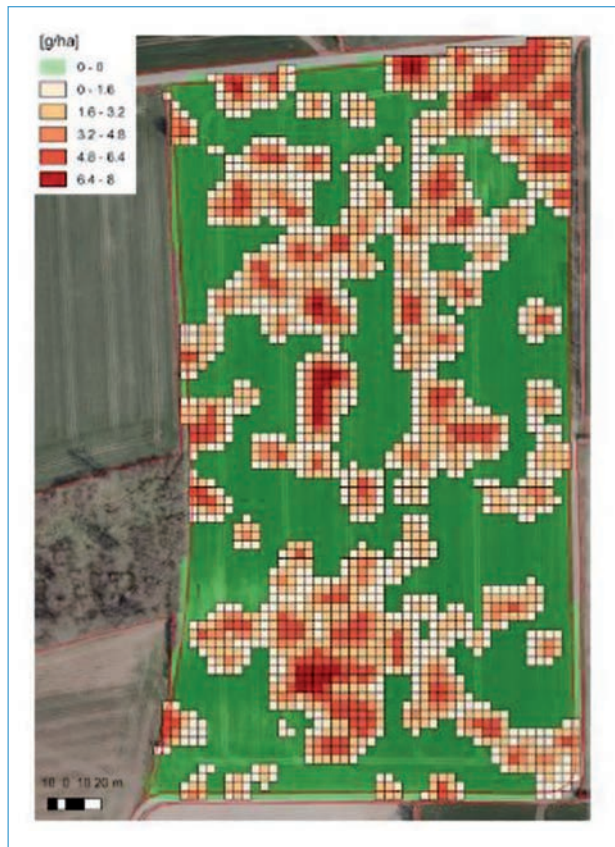
ción variable en función de las especies presentes y de su densidad o nivel de infestación. Un ejemplo de ello puede verse en la **figura 4**.

En ambos casos, es necesario conocer la biología de las especies presentes dado que podrían aparecer nuevos picos de germinación o nuevas especies tras el tratamiento. Este efecto, si no se tiene en cuenta, podría afectar a la implementación de este tipo de tecnologías, que, si se aplican correctamente, tienen un potencial de reducción de uso de herbicidas muy importante, incluso superior al 50% en condiciones de baja infestación. En agricultura es imprescindible conocer las parcelas e incluir la agronomía en la toma de decisiones. No se puede hacer agricultura de precisión desde la oficina y la utilización de tecnología no es garantía de éxito *per se*.

Generación de mapas de prescripción

Para que un pulverizador equipado con tecnologías de aplicación variable pueda ejecutar una aplicación variable que tenga en cuenta las diferentes especies presentes o bien el tipo de suelo y su contenido de materia orgánica es necesario elaborar previamente un mapa de prescripción. Este mapa indicará al pulverizador dónde aplicar herbicida y con qué dosis. Para elaborar dicho mapa de prescripción se tendrán en cuenta tanto los mapas de infestación, en el caso de las aplicaciones de postemergencia, como los mapas de suelo para las aplicaciones de preemergencia y deberá indicarse la dosis a aplicar en cada punto del mapa.

Este es otro cuello de botella en la toma de decisiones ya que, como hemos



visto con anterioridad, generalmente se desconoce cómo afectan todos estos parámetros a la eficacia de los herbicidas y, por lo tanto, establecer la dosis óptima para cada punto de la parcela resulta una tarea difícil y arriesgada. Es ahí donde el DSS IPMwise juega un papel importante, ya que permite calcular la dosis adecuada para cada ubicación de la parcela, dependiendo de las especies, tipo de suelo y las condiciones de tratamiento, generando los mapas de prescripción (**figura 5**) en formato Shapefile o Iso-XML necesarios para poder ser cargados en los pulverizadores.

Pulverización variable

El paso final en el control de las malas hierbas es la pulverización de la mezcla

herbicida. En agricultura de precisión, estas aplicaciones pueden ser de tipo selectivo o a dosis variable. En las aplicaciones selectivas, el pulverizador aplica herbicida solamente en los puntos de la parcela donde hay malas hierbas. Esta información se la proporcionan o bien sensores que trabajan en tiempo real o bien se obtiene a partir de un mapa de prescripción. En cualquier caso, la dosis aplicada cuando haya malas hierbas será siempre del 100% y del 0% cuando no haya, en lo que podríamos denominar un sistema binario o todo/nada. En el caso de aplicaciones a dosis variable, el pulverizador solamente aplicará herbicida en presencia de malas hierbas pero, además, podrá ajustar la dosis aplicada. En ambos casos, los pulverizadores deberán incorporar las denominadas tecnologías de aplicación variable (o *Variable-Rate Technologies*, VRT).

En el caso de aplicaciones selectivas, el pulverizador incluirá electroválvulas de corte que permitirán o interrumpirán el caudal de las boquillas. El control del caudal de las boquillas se puede realizar por secciones de la barra de pulverización o bien de forma independiente para cada una de las boquillas. El nivel de control que incorpore el pulverizador determinará la resolución espacial del tratamiento y, en caso de realizarse en base a un mapa de prescripción, la resolución de éste. Es decir, si la apertura o cierre de las boquillas se realiza por secciones y estas tienen, por ejemplo, una longitud de 3 metros, no tendrá sentido establecer zonas de aplicación selectiva de ancho inferior a 3 m. En lo que se refiere a la longitud de esas zonas, ésta no deberá ser inferior a la distancia que recorrerá una boquilla mientras se está cerrando hasta

que dejará de pulverizar definitivamente. Es decir, si una sección o boquilla tarda 5 segundos en pasar de caudal 0 a caudal nominal, la distancia necesaria para abrir o cerrar en un tratamiento realizado a 6,5 km/h será de 9 m y no tendrá sentido generar zonas de longitud inferior. La incorporación de controles de la pulverización a nivel de boquilla con electroválvulas de solenoide hace que los tiempos de apertura y cierre sean mucho más cortos que en electroválvulas motorizadas y se pueda llegar a una resolución de los tratamientos de hasta 0,5 m tanto longitudinales como transversales.

En el caso de aplicaciones a dosis variable, además de lo indicado para aplicaciones selectivas será necesario modificar el caudal de las boquillas para modificar la dosis aplicada. La modulación del caudal tradicionalmente se ha hecho modificando la presión de trabajo. Actualmente, los sistemas electrónicos embarcados en pulverizadores variables permiten ajustar la presión en tiempo real a nivel de secciones de la barra. Sin embargo, modificar la presión de trabajo, además de modificar el caudal, también implica un cambio en el tamaño de las gotas. Para evitar este efecto y para conseguir un control del caudal a nivel de boquilla, se han desarrollado los sistemas de pulverización variable por modulación del ancho de pulso o PWM (del inglés *Pulse Width Modulation*), que permiten modificar el caudal pulverizado a presión constante.

En definitiva, como se ha dicho, para poder incluir información sobre las especies de malas hierbas y las características del suelo, actualmente es imprescindible trabajar con mapas de prescripción. En este caso, además de incorporar tecnologías de aplicación variable, los pulverizadores deben incorporar un receptor SSNG (sistemas satelitales de navegación global), mal llamado GPS, para conocer su ubicación sobre el mapa de prescripción y aplicar la dosis establecida para ese



La principal limitación de los equipos actualmente en el mercado para la aplicación localizada de herbicidas es la capacidad de distinguir entre las diferentes especies de malas hierbas y, por tanto, no pueden aplicar de forma automatizada el ingrediente activo más adecuado para cada caso concreto.

punto. El hecho de realizar aplicaciones en base a mapas permite conocer a priori la cantidad de mezcla o caldo herbicida que se va a utilizar en el campo y preparar solamente la cantidad necesaria en el pulverizador, reduciendo al máximo los remanentes, que no hay que olvidar que son un residuo contaminante. También sería interesante disponer del mapa de aplicación que algunos pulverizadores ya ofrecen donde se indica la dosis realmente aplicada en cada punto de la parcela y otros parámetros de trabajo. El mapa de aplicación debería ser lo más parecido posible al mapa de prescripción.

Conclusión

El hecho de tener en cuenta parámetros como las especies presentes en una par-

cela, las características del suelo como su textura y cantidad de materia orgánica y, además, la distribución espacial de todos estos parámetros dentro de la parcela permite llevar a cabo aplicaciones basadas en mapas a dosis variables. Todo ello ya es comercialmente posible gracias a la aparición en el mercado de sistemas de monitorización de alta resolución, de sistemas de ayuda a la decisión como IPM-Wise y de pulverizadores variables.

Todas estas soluciones mezclan tecnología y conocimientos agronómicos a partes iguales en el contexto de la agricultura de precisión para conseguir una agricultura más sostenible y eficiente sin perder capacidad productiva. En el caso concreto de la aplicación de herbicidas, la solución presentada contribuirá, sin duda, a eliminar los episodios de contaminación de aguas que se hacen tristemente famosos de vez en cuando en España y también a conseguir el objetivo del Pacto Verde Europeo y su estrategia Del Campo a la Mesa (*Farm to Fork*) de reducir en un 50% el uso de fitosanitarios para 2030. ■

BIBLIOGRAFÍA

Cardwell, 1982. V.B. Cardwell. Fifty years of Minnesota corn production: sources of yield increase. *Agron. J.*, 74 (1982), pp. 984-990.

Lund, E.D., Colín, P.E., Christy, D., Drummond, P.E. (1999). Applying soil electrical conductivity to precision agriculture. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture* (pp. 1089-1100). St. Paul, MN, July 19-22, 1998. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA.

Martínez-Casasnovas, J.A., Arnó, J., Escolà, A., 2022. Sensores de conductividad eléctrica aparente para el análisis de la variabilidad del suelo en Agricultura de Precisión. En: A. Namesny, C. Conesa, L.M. Olmos, P. Papasseit (Eds), "Tecnología Hortícola Mediterránea. Evolución y futuro: viveros, frutales, hortalizas y ornamentales". Biblioteca de Horticultura, SPE3 S.L., Valencia, España. 1075 pp. ISBN: 978-84-16909-46-9. Open Access https://issuu.com/horticultraposocosecha/docs/tecnologia_horticola_mediterranea, pag 765-786.

Montull, J. M., Taberner, A., Bøjer, O., & Rydahl, P. (2020). Decision Support Systems for Weed Management. *Decision Support Systems for Weed Management*, 279-298. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44402-0>

Rydahl, P., Bojer, O. M., Soerensen, M., Jensen, N.-P., Back-Nielsen, M., Paz, L.-C., ... Joergensen, R. (2022). Economic potential of RoboWeedMaps - use of machine learning for production of weed maps and herbicide application maps. In 15th international Conference on Precision Agriculture.

Sudduth, K. A. and J. W. Hummel. 1993. Soil Organic-Matter, CEC, and Moisture Sensing With a Portable NIR Spectrophotometer. *Transactions of the ASAE*, 36(6): 1571-1582.