

Sensores para conocer los suelos y su fertilidad y actuar en consecuencia

P. Barreiro y B. Diezma.

LPF_TAGRALIA. UPM_CEI Mondoa.

Cuando se realiza un mapeado de la productividad superficial de una parcela (kg/ha) (**figura 1**), se encuentra en muchas ocasiones una variabilidad muy elevada (entre el 30 y 80% según los casos) asociada a diversidad edáfica (materia orgánica, textura y nutrientes), de manejo del suelo (laboreo y compactación por tráfico de vehículos), topográfica (pendiente y orientación que redundan en variaciones en la acumulación de humedad y evolución de la temperatura) y de actividad biológica (plagas y enfermedades). Mapear el suelo mediante los tradicionales sensores (que se describirán posteriormente) montados en plataformas terrestres específicas está especialmente indicado para acotar la distribución espacial de propiedades del suelo espacialmente estáticas como la textura, el nivel freático y la salinidad, aportándonos capas de información con una elevada resolución espacial (**foto 1**). El coste de utilización de estos equipos no justifica su empleo para conocer propiedades mucho más dinámicas (variables a lo largo de la campaña) como el contenido de agua en el suelo. La filosofía es mapear los suelos al menos una vez en aquellas parcelas con elevada variabilidad en la productividad espacial (al menos un 25%) contratando el servicio, e intentar asociar poste-

En este artículo vamos a ofrecer una panorámica de los equipos de mapeo de suelo, desde las plataformas que están disponibles comercialmente desde principios de este milenio orientadas a empresas de consultoría agronómica, hasta los más recientes desarrollos comercializados (patentes con prioridad posterior a 2015) y con doble función de mapeado y de control de cuerpos de siembra en tiempo real.



Foto 1. Ejemplo de dispositivo de mapeado de suelo. En este modelo Veris Quad 2800 se determina la conductividad eléctrica del suelo a dos profundidades.

riormente la productividad en relación al conjunto de datos disponible, y así tomar decisiones relativas a la fertilización y densidad de siembra. Las empresas que ofrecen estos servicios de mapeado del suelo se dedican específicamente a labores de asesoría y no realizan labores agrícolas tradicionales. El coste en la contratación de un mapeado puede oscilar entre 25 euros/ha para superficies inferiores a

20 ha hasta 10 euros/ha para superficies superiores a 200 ha, aunque suele existir un coste mínimo de varios cientos de euros. Es conveniente al contratar el servicio, solicitar además un número mínimo de muestras de suelo analizadas en laboratorio cuya localización venga determinada por los mapas dinámicos. Denominaremos tradicionales a los distintos sensores eléctricos, electromagnéti-

Figura 1 Ejemplo de mapa de rendimiento en una parcela con una variabilidad del 58%, en la que se han definido cinco zonas de gestión tal y como figura en la escala de color.

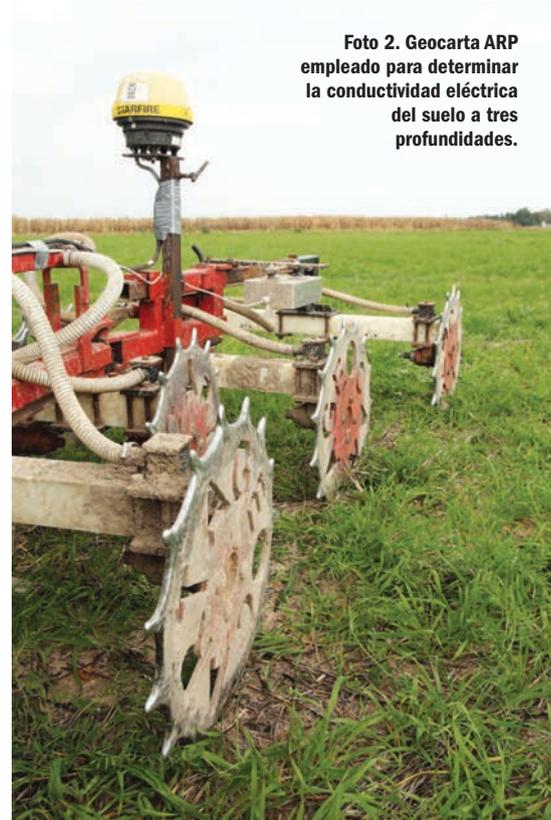
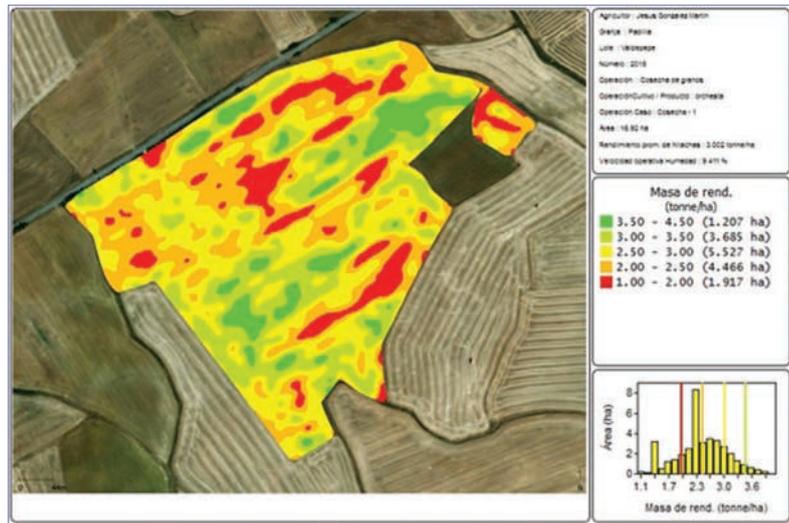


Foto 2. Geocarta ARP empleado para determinar la conductividad eléctrica del suelo a tres profundidades.

cos, ópticos y electro-químicos que han proliferado en la última década del siglo XX y que se distribuyen en las mencionadas plataformas de tamaño medio, con un uso específico en mapeado en una actividad independiente de las labores agrícolas (**fotos 2 y 3**). La mayoría de ellos tiene como característica común su sensibilidad a más de un factor agronómico del suelo. Los sensores eléctricos y electro-magnéticos, junto con los ópticos son los más inespecíficos (textura, materia orgánica, contenido en agua, nitratos, capacidad de intercambio catiónico), mientras que los sensores electro-químicos permiten detectar independientemente parámetros como la salinidad, el pH, y la composición en una variedad de iones (potasio, nitratos, magnesio). Los sensores son tanto más complementarios cuanto más distintos son los parámetros que determinan, y tanto más redundantes cuanto más coinciden en las características registradas. Mientras que los sensores eléctricos y electromagnéticos aportan una única señal de salida, la conductividad eléctrica aparente (CEa), los sensores ópticos estiman varias propiedades del suelo independientemente, aunque no las miden

directamente como los electro-químicos (aún de uso limitado y con escasos resultados prácticos a excepción del pH). El reto por tanto es seleccionar el conjunto de tecnologías con una mayor potencialidad que en el momento actual se centra en la combinación de sensores ópticos y de conductividad eléctrica (eléctricos o electromagnéticos).

Sensores eléctricos y electromagnéticos

Como se ha indicado, el parámetro eléctrico que establecen los sensores eléctricos y electromagnéticos es la conductividad eléctrica aparente (CEa o ECa en inglés, mSm^{-1}) que es un promedio de la circulación eléctrica por tres vías distintas: la fase líquida del suelo que tiene nutrientes disueltos, la fase sólido-líquida debida al intercambio de cationes asociado con arcillas y minerales y la fase sólida derivada del contacto físico entre partículas sólidas. No debe confundirse la CE aparente con la CE determinada en laboratorio sobre muestras de suelo pulverizado donde no existen agregados ni poros de aire. La **figura 2** muestra los valores promedio

y la variabilidad de CEa para textura arcillosa (100 mS/m), limosa (10 mS/m) o arenosa (1 mS/m). Podemos comprobar que el valor de CEa es 10 veces menor en suelos arenosos que limosos, y 100 veces menor en los arenosos que en los arcillosos. Los suelos arcillosos además pueden ofrecer grandes variaciones en la CEa, desde valores parcialmente superpuestos a los suelos limosos hasta valores extremadamente altos como 1.000 mS/m. De ello se deduce, que los mapas de CEa capturan muy bien las diferencias texturales de los suelos. Existen tres grandes casas comerciales que comercializan equipos para la determinación de las propiedades eléctricas del suelo: Veris (3100), Geocarta (ARP) y Geonics (EM38). Las dos primeras emplean métodos resistivos (ER) sobre la base de una medida directa (DC) de la conductividad eléctrica y precisan la introducción en el suelo de electrodos; cada equipo dispone de varios pares de electrodos, similares a discos de grada, que caracterizan el suelo a distinta profundidad (2 niveles en Veris y 3 en Geocarta).

Figura 2 Valores típicos de conductividad eléctrica aparente (CEa) de los elementos texturales del suelo: arena, limo y arcilla.

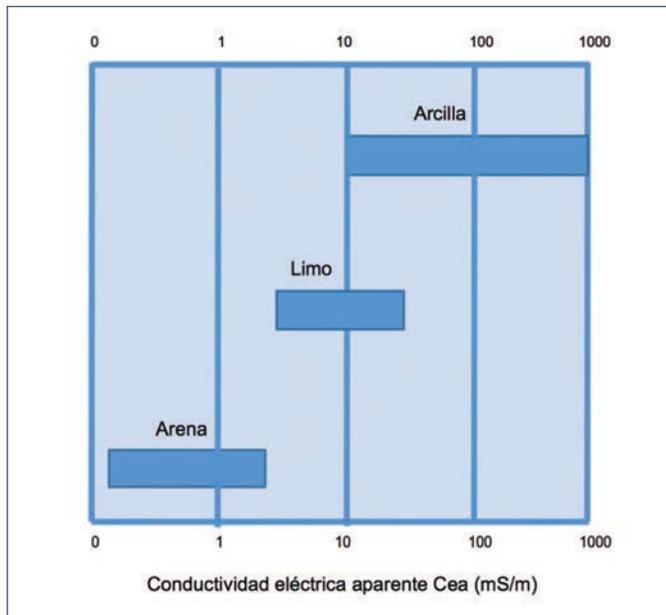
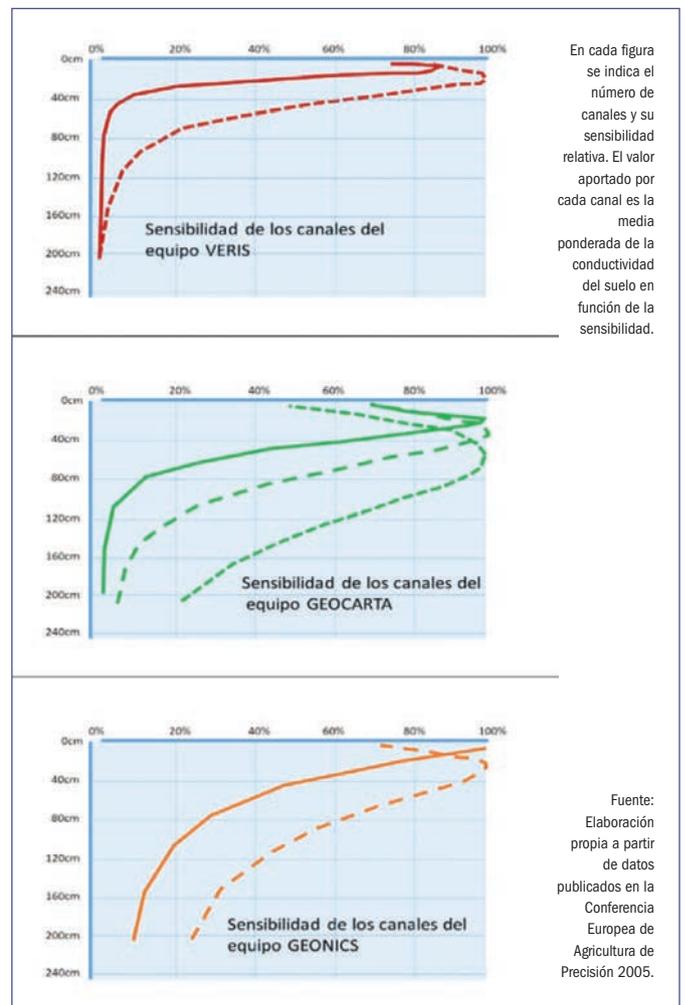


Foto 3. Geonics EM38 empleado para determinar la conductividad eléctrica del suelo. Abarca una o dos profundidades dependiendo de si es dual o no.

Figura 3 Sensibilidad en profundidad de los equipos comerciales que determinan la conductividad eléctrica aparente (CEa): Veris, Geocarta y Geonics.

Geonics en cambio ofrece equipos comerciales basados en inducción electromagnética (EMI) que emplean corriente alterna que al circular por una bobina emisora genera un campo magnético en el suelo, que a su vez genera una corriente eléctrica en una bobina receptora. Estos sensores no precisan penetrar en el suelo. La señal EMI es amplificada y acondicionada en voltaje, siendo proporcional al volumen de suelo evaluado y a la CEa del mismo. El modelo EM-38 dual-dipole dispone de una bobina horizontal y otra vertical que van alternando sus medidas cada varios segundos. La configuración horizontal o vertical aporta información en distintos niveles de profundidad (mayor cuando la bobina está en posición horizontal que en vertical, EMh y EMv respectivamente). Además, la relación de conductividades aparentes obtenidas con EMh y EMv refleja las propiedades de conductividad hidráulica del suelo, y permite evaluar la lixiviación de nutrientes.

La **figura 3** nos indica la sensibilidad y capacidad de penetración en profundidad en el suelo para los canales de cada equipo: Veris, Geocarta y Geonics EM38-dual. Cada canal tiene asociada una curva de sensibilidad, de manera que el valor de CEa aportado por cada canal es una media ponderada en la profundidad de suelo afectada. Existe siempre una profundidad en la que la sensibilidad es máxima, aunque es importante insistir que el resultado final en CEa es la media ponderada de todas las profundidades abarcadas por cada curva. Estos datos son poco conocidos y hay que recurrir a una comunicación de la Conferencia Europea de Agricultura de precisión en 2005 para localizarlos.



De la **figura 3** se deduce que el equipo Veris es el que realiza un mapeo más superficial con dos canales bien separados en profundidad, siendo apto para cultivos herbáceos (horizonte de hasta 40 cm). El equipo Geocarta dispone de un canal apto para cultivos herbáceos (40 cm) y otros dos más adaptados a cultivos vivaces como la vid o frutales de pequeño porte (hasta 1,6 m de profundidad de raíz), mientras que el Geonics EM38 dispone de dos canales y permite determinar texturas a una profundidad de 40 cm y 1,4 m, comparables al primer y tercer canal de Geocarta.

En 2011 se publicó en la revista *Irrigation Science* un estudio científico que comparaba el uso del equipo Veris y Geonics EM38 para el caso de una plantación de almendro. Como era esperable, los resultados que mejor se correlacionaron con la



Foto 4. Veris Opticmapper que dispone sólo de dos longitudes de onda para determinar a materia orgánica. La patente de 2012 propone un espectrómetro VIS-NIR que actualmente no se comercializa.

productividad superficial (kg/ha) de los almendros correspondió al equipo de mayor penetración (EM38) por tratarse de un cultivo leñoso con elevado desarrollo radicular en profundidad. En el estudio fue

factible establecer con el EM38 cuatro zonas con productividades crecientes entre 2.600 y 4.000 kg/ha, no así con el equipo Veris. Es extremadamente importante, por tanto, conocer la sensibilidad de los equi-

Elija soluciones personalizadas para la agricultura inteligente

Sea cual sea su tipo de parcela, de cultivo o de vehículo, Topcon ofrece para cada temporada instrumentos de precisión que le ayudan a satisfacer las necesidades de un mundo cambiante.

TOPCON
Agriculture



- ✓ Dosis variable
- ✓ Control de secciones
- ✓ Control de implementos
- ✓ Compatible con ISOBUS
- ✓ Guiado

DIGI★STAR

NORAC

RDS TECHNOLOGY

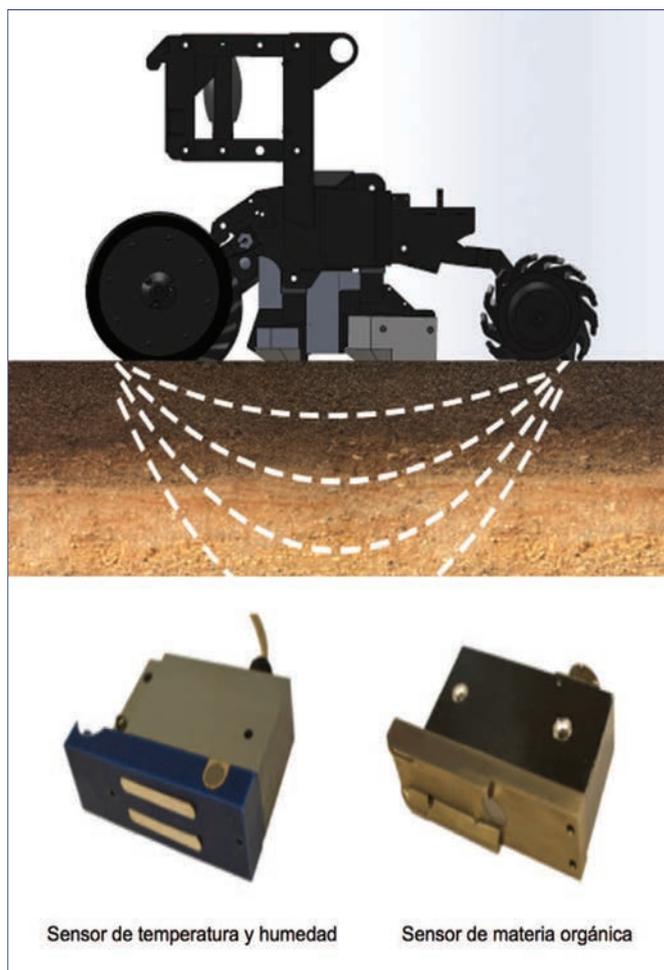
pos en profundidad y no caer en conclusiones precipitadas. En caso de haberse tratado de trigo, los resultados hubieran sido distintos.

Sensores ópticos

Históricamente en la caracterización del suelo agrícola mediante sensores ópticos se ha empleado el espectro visible (Vis, 400-700 nm), al fin y al cabo, el color ha sido siempre un claro indicador de la presencia de arcillas y materia orgánica. Más recientemente se ha incorporado el infrarrojo cercano (NIR, 700-2.400 nm), bandas donde los grupos funcionales C-H, N-H y O-H absorben energía, siendo por tanto muy útil para cuantificar distintas formas de carbono, nitrógeno y agua, respectivamente.

La determinación espectral del suelo con sensores montados en plataformas móviles (condiciones dinámicas) requiere el empleo de una ventana transparente de zafiro (resistente al deterioro), instalada en la base de una reja, junto con un sistema de iluminación (**foto 4**). Estos sistemas requieren un proceso de calibración frecuente porque conviene recordar que realizamos estimaciones indirectas de las propiedades del suelo. La marca comercial más extendida es Veris. Los datos disponibles, indican que sus equipos han mejorado la capacidad predictiva de un 40% al 80-90% entre 2010 y 2015. Veris, ofrece una combinación de equipos de conductividad eléctrica, óptico y electro-químico en plataformas de tamaño medio (modelo MSP3), encaminados a la estimación de tres propiedades del suelo:

Figura 4 Esquema del funcionamiento de iScan de Veris que indica la penetración en la determinación de la CEa. Los sensores ópticos y de humedad se detallan en la fotografía inferior.



el porcentaje de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico (meq/100g) y el pH, con la capacidad predictiva indicada. La pregunta que surge inmediatamente es por qué estos parámetros y no otros.

Bien, la conductividad eléctrica aparente (CEa) nos da una indicación de la textura (como ya hemos mostrado) pero también de la capacidad de intercambio catiónica (CIC) relacionada con los iones retenidos en el complejo arcillo-húmico (evita su lavado o lixiviación) y por tanto quedan disponibles para ser absorbidos a través de las raíces de las plantas. Sin embargo, la CEa se ve afectada por la cantidad de

materia orgánica (MO) y de humedad en el suelo siendo necesario establecer correcciones para definir mejor la textura.

Una medida independiente de la cuantía de la MO nos permite eliminar el sesgo en la extracción de conclusiones respecto a la CEa, y nos indica a su vez otro aspecto de la fertilidad imprescindible para la salud de la biota del suelo (conjunto de organismos vivos que habitan en él). La materia orgánica aporta estabilidad a la estructura del suelo, puesto que forma parte del mencionado complejo arcillo-húmico que aglutina las partículas dando lugar a agregados estables que favorecen además una correcta porosidad en el suelo con la consecuente aireación e infiltración del agua en el mismo. Niveles adecuados de materia orgánica se sitúan entre el 1% y 3% aunque en la mayor parte del terreno extensivo español los valores actuales son prácticamente inexistentes debido a la casi exclusiva

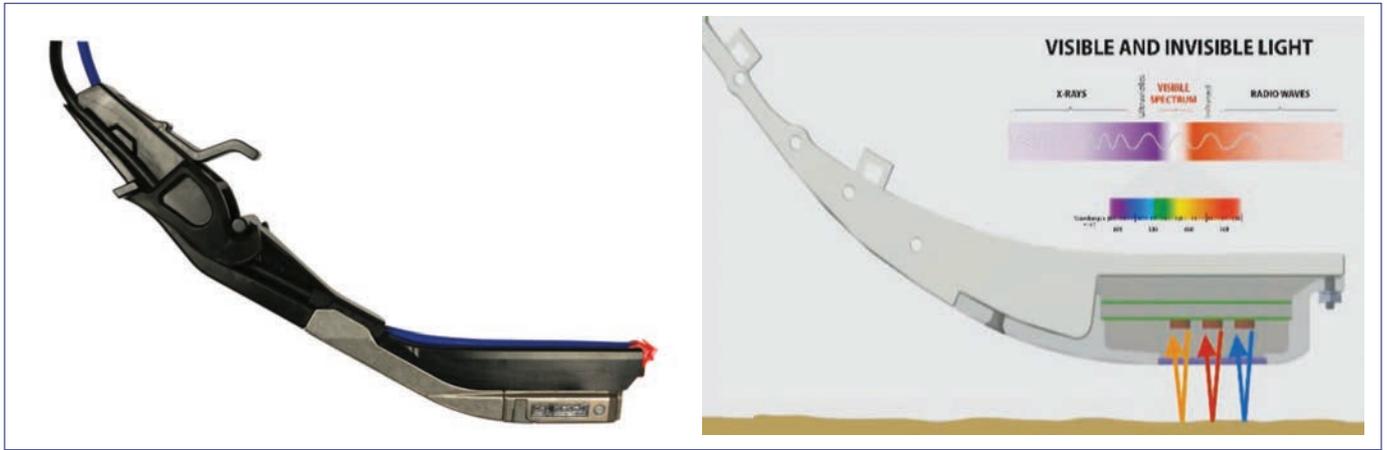
fertilización mineral.

Finalmente, el pH nos indica si estamos en suelos básicos o ácidos y en combinación con la CIC nos permite establecer el tipo y cuantía de las enmiendas a aplicar, en caso necesario, y a decidir los cultivos que más se adaptan a este tipo de suelo. Por tanto, la determinación independiente de esta terna de parámetros CEa, MO y pH es de extrema utilidad.

Nueva generación de sensores de suelo embarcados

En 2017, Veris patentó el sistema iScan (US 9,585,301 B1) que es una plataforma

Figura 5 Smart Firmer de Precision Planting, el módulo óptico emplea tres longitudes de onda para estimar la materia orgánica en rangos de 0,5% a 6%.



pequeña equiparable a un cuerpo de siembra monograno, que puede incorporarse a gradas y arados, o emplear en equipos de siembra directa que trabajen incluso a velocidades superiores a 7 km/h. Si se incorpora en un equipo de siembra puede emplearse para un control activo de la profundidad de siembra con una regulación variable a lo largo de la parcela, tal y como se refleja en la patente. El equipo iScan (**figura 4**) determina la humedad y temperatura del suelo, materia orgánica (mediante reflectancia óptica), y conductividad eléctrica aparente (mediante electrodos de conductividad directa). Mientras que la humedad y temperatura se emplean en tiempo real para proponer la profundidad de siembra más eficaz, las determinaciones de conductividad y materia orgánica (corregidas en humedad y temperatura) se almacenan en mapas para un uso posterior. Respecto al equipo Veris

MSP3, mencionado anteriormente, hay que indicar que no establece medidas a varias profundidades y no determina el pH. También Precision Planting se ha incorporado a este concepto con el dispositivo Smart Firmer (**figura 5**) (patente con prioridad en 2017 y publicación final en 2020, US 10,806,072 B2). En este caso se trata de un módulo que determina temperatura, humedad, materia orgánica, nivel de residuo y contacto semilla suelo. Este equipo está preparado para dar señal de control para fertilización y siembra variable. En combinación con el dispositivo SmartDepth de la misma marca (en pruebas desde 2019), se puede variar de ma-

nera individualizada la profundidad de los cuerpos de siembra empleando para ello un motor eléctrico (**foto 5**).

Tanto iScan de Veris como SmartFirmer de Precision Planting muestran un sesgo en el desarrollo de las plataformas de sensores de suelo embarcados, hacia equipos de pequeño tamaño (y menor coste) que pueden ser adquiridos por agricultores profesionales y empresas de servicios, y empleados sistemáticamente y no solo alquilados para una caracterización esporádica de las parcelas; en todo caso es recomendable recurrir a una consultoría agronómica para la interpretación de los datos si no se dispone de personal técnico suficientemente preparado. En cambio, los dispositivos de Geonics EM38 o Geocarta ARP parecen ser ineludibles en cultivos vivaces y leñosos, con un desarrollo radicular profundo. ■



Foto 5. SmartDepth de Precision Planting, un motor eléctrico para el control de la profundidad de acuerdo a la información de SmartFirmer.

BIBLIOGRAFÍA

Existe una amplia bibliografía que se puede consultar en las siguientes referencias de las autoras:

Barreiro Elorza, P. (2007). Sensores para la caracterización del suelo agrícola usados en agricultura de precisión. *Vida rural*, (260), 38-42.

Vega, N. S., González, A. M., y Barreiro Elorza, P. (2015). La importancia del suelo en la producción agrícola. *Tierras de Castilla y León: Agricultura*, (231), 16-25.

Nuevas Tecnologías e Innovación en La Gestión De Riesgos Agrarios (2019) curso online en abierto <https://miriadax.net/web/como-gestionar-los-riesgos-agrarios-y-ambientales-2-edicion->

SPARKLE (2020) curso online en abierto <http://sparkle-project.eu/moodle/>