

8. PROPUESTAS TECNOLÓGICAS PARA UNA GESTIÓN EFICIENTE EN AGRICULTURA DE REGADÍO

*Carlos Campillo Torres
Henar Prieto Losada
Sandra Millan Árias
Rafael Fortes Gallego*

1. LA REVOLUCIÓN TECNOLÓGICA EN LA AGRICULTURA

La revolución verde permitió un importante incremento de la productividad agrícola entre los años 1960 y 1980, integrando el uso de variedades resistentes a los climas extremos y plagas, capaces de alcanzar altos rendimientos con el empleo de fertilizantes, plaguicidas y riego (FAO 1996). En los tiempos actuales podemos estar asistiendo a una nueva revolución: la revolución tecnológica, la cual, además de poner nuevos techos a la producción abre la puerta a una agricultura más eficiente, con nuevas oportunidades de negocio y empleo más atractivos para una juventud más habituada a un entorno dominado por las tecnologías de la información y las comunicaciones (TICs).

En el campo se relaciona el avance tecnológico con la agricultura de precisión (AP). La AP es la aplicación de tecnologías y principios para el manejo de la variabilidad espacial y temporal asociada a todos los aspectos de la producción agrícola, con el propósito de mejorar la productividad del cultivo y la calidad ambiental (Pierce y Nowak, 1999). La AP abarca la combinación de diversas tecnologías y fuentes de información e incluye: datos recogidos en campo (características físicas y químicas del suelo, topografía, datos de productividad); información derivada de la interpretación de imágenes satelitales (variabilidad espacial y/o temporal del cultivo) y la generación de mapas con prescripciones de aplicación de insumos. A partir de la integración espacial (geográfica) y/o temporal de las distintas fuentes de información sobre la parcela, se pretende adoptar las decisiones agronómicas más acertadas para optimizar el rendimiento económico y reducir los impactos ambientales en el área de producción (Charlotte et al., 2014). Con este enfoque, la complementariedad de la agricultura de precisión con la tradicional es clara y contundente, debido a la posibilidad de utilizar los insumos de forma cada vez más eficiente con dosis adecuadas y de acuerdo a la real necesidad del cultivo.

Con esta información espacial y gracias al desarrollo de maquinaria de campo adaptada es posible la aplicación de insumos solo en las áreas en las que resulta necesario y en donde la respuesta de esta intervención tendrá un claro beneficio económico. Las consecuencias son la disminución del impacto sobre el medio ambiente al reducir el aporte de agroquímicos y el gasto energético, lo que además de contribuir a mitigar el cambio climático, reduce los costes de producción.

La AP no es el paradigma de resolución de todos los problemas del campo. Por sí sola no va a plantar, cultivar y cosechar, sino que es una herramienta que nos puede ayudar a que la

toma de decisiones sea más acertada. Pero al hablar de revolución tecnológica en el campo nos referimos no solo a AP, sino también a la incorporación de la Tecnología de la Información y las Comunicaciones (TICs) que hace posible captar almacenar y transmitir una gran cantidad de información y a la integración de la misma en sistemas informáticos que la transforman en una información más accesible para la toma de decisiones en un formato adaptado al usuario final. Probablemente un punto clave para este avance ha sido la incorporación del GPS a la gestión de las parcelas. La posibilidad de georeferenciar toda la información captada en el campo, permite tener una visión espacial de la misma ofreciendo una nueva perspectiva.

A lo largo de este capítulo se pretende ofrecer una visión realista sobre las posibilidades que ofrecen estas tecnologías a día de hoy, diferenciándolas de las que podrán ser accesibles en un futuro, probablemente no muy lejano, porque una cosa indudable es que su avance es rápido e imparable.

2. LA GESTIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL EN LAS PARCELAS AGRÍCOLAS

Al hablar de variabilidad espacial (VE) nos referimos a la existencia de una heterogeneidad de un determinado factor en una misma parcela. Esta variabilidad puede tener su origen en diferentes factores como el clima, el relieve, el suelo, factores biológicos e incluso factores agronómicos (Gómez-Miguel et al 2017) y de usos previos. Como consecuencia de la VE la aplicación eficiente de las prácticas culturales se complica obligando a una toma de decisiones poco objetiva. Tanto el suelo como el cultivo nos pueden proporcionar la información necesaria para caracterizar esa variabilidad, información fundamental para mejorar la gestión de la parcela.

2.1 El suelo

Al igual que las características del suelo cambian con la profundidad, también puede haber cambios entre diferentes puntos de la parcela y esta heterogeneidad de suelo añade un punto más de complejidad a la gestión eficiente de los cultivos, ya que puede dar lugar a diferencias importantes de producción al tratar de la misma forma el conjunto de la parcela. Por ejemplo, un sistema de riego localizado bien diseñado permite conseguir una alta uniformidad en la aplicación del riego entre los distintos puntos de la parcela, pero al elegir la sistemática de riego, si dentro de la parcela hay suelos con diferente textura, parte de la misma puede quedar bien regada (poner todo el agua a disposición de la planta) y parte no, con pérdidas por lixiviación o escorrentía.

Un primer paso es caracterizar la variabilidad en el suelo: clasificar los tipos de suelo que tiene la parcela y definir la superficie que ocupa cada uno de ellos. Esto es posible con la ayuda de equipos que efectúan medidas sobre el suelo de forma continua y posicionan con un GPS cada dato recogido. El resultado es un mapa de la parcela para ese parámetro medido que de un vistazo nos aporta información sobre las diferencias que podemos encontrar dentro de la parcela. Uno de los parámetros más utilizados es la *conductividad eléctrica aparente* (CEa) que ha demostrado ser un indicador eficaz y rápido de la variabilidad y productividad del suelo

(Kitchen et al., 1999). Esta variable mide la facilidad para conducir la corriente eléctrica a través del suelo. La CEa está relacionada con diversos factores como son la cantidad de agua en el suelo, la agregación del suelo (agentes cementantes como arcillas, materia orgánica y estructura del suelo), contenido en materia orgánica, electrolitos en la solución del agua (salinidad, iones, contenido de humedad del suelo, y temperatura del suelo), y la conductividad de la fase mineral (tipo y cantidad de minerales). Estos factores, interrelacionados entre sí, son importante desde el punto de vista de fertilidad del suelo. Existen dispositivos comerciales que han desarrollado medidas rápidas y masivas de CEa, entre ellos podemos destacar los sensores VERIS 3100, EM38 y DUALEM 1S. Estos equipos toman medidas desplazándose por la parcela bien con tractor, o con cualquier otro vehículo, dependiendo del tipo de dispositivo y de la superficie. Aunque esta es la medida más utilizada, también es posible medir pH. Incluso se pueden utilizar imágenes, tanto en el espectro visible o distintas longitudes de onda que se pueden tomar de forma remota. El ejemplo más sencillo nos lo proporciona el Google Earth, cuando las imágenes coinciden con un periodo sin vegetación.

La gran cantidad de factores que pueden hacer variar la CEa hacen que un mapa de ésta, no nos dé una información suficiente, pero si es de gran ayuda para orientar el necesario estudio en campo. Este tipo de tecnologías facilitan la clasificación de la parcela en función del suelo, las distintas zonas, determinando la importancia cuantitativa de cada una de ellas y decidir qué puntos pueden proporcionar más información para realizar un estudio “in situ” (calicatas, muestreos de suelo, etc.)

En estudios realizados por el CICYTEX se ha encontrado relación entre la CEa y la textura del suelo y también con el contenido de agua útil en las distintas partes de la parcela. Esta información resulta muy útil para el diseño de instalaciones de riego, permitiendo la agrupación de los sectores de riego con un tipo de suelo similar y para decidir la sistemática de riego más adecuada durante la campaña de riego en función de las características dominantes en cada sector (Fortes et al 2015). Conocer mejor la VE es también interesante para decidir la mejor ubicación de sensores de humedad en el suelo o cualquier otro punto de control para ajustar las operaciones de cultivo.

2.2 El cultivo

El desarrollo de un cultivo depende del conjunto de condiciones agroclimáticas en las que se encuentre, lo que se traduce en que, si no son homogéneas, tampoco lo serán las plantas que se integran en la comunidad. Al igual que en el suelo, las nuevas tecnologías permiten monitorizar la vegetación. La monitorización de las superficies agrícolas mediante mapas de cultivo ofrece a los productores una información directa para analizar la variabilidad, ayudándoles a planificar sus actuaciones de cara a mejorar las prácticas productivas (Kitchen et al., 2003). Así, disponer de mapas de estado nutricional del cultivo permite ajustar, adaptar y dirigir la fertilización de la campaña presente y/o futura; los mapas de estado hídrico aportan información del efecto que tiene la programación de riego sobre el estado hídrico de las plantas; los mapas de predicción de cosecha serán útiles para programar en fecha y forma la recolección; y los de cosecha aportan una información muy útil sobre cuáles son las zonas más y menos productivas. También se ha demostrado el interés de estos para detectar daños causados por plagas, enfermedades o agentes abióticos e identificar la superficie afectada.

La información referente al cultivo puede obtenerse en un formato sencillo e intuitivo como son las imágenes en el espectro visible de la parcela, fotografías aéreas o tomadas desde satélites que proporcionan una visión del conjunto de la parcela. Estas imágenes pueden ser la primera aproximación de la VE ya que en muchos casos estas imágenes permiten identificar a simple vista diferentes zonas tanto en suelo como en vegetación, por diferencias en tonalidades o aspecto.

Las imágenes visibles pueden ser fácilmente obtenidas de diferentes servicios, como pueden ser imágenes estatales (PNOA) o Google Earth. Estos sistemas permiten acceder a imágenes históricas, las cuales pueden ayudar a explicar una variabilidad en nuestra parcela, que pueda deberse por ejemplo a un uso anterior de la parcela. La limitación es que no existe garantía de disponer de las fechas que puedan resultar de mayor interés, sino que hay que adaptarse a la información disponible, a no ser que se contraten servicios específicos (vuelos, compras de imágenes de satélites)

Las imágenes de reflectancia, se basan en que todas las superficies absorben parte de las longitudes de onda del espectro de luz solar y otra parte la reflejan. Esta parte reflejada o reflectancia en las distintas partes del espectro de radiación, es diferente en función del tipo de superficie y en el caso de los vegetales varía con la especie, con la variedad y con el estado de las plantas (hídrico, nutricional, sanitario, etc.) (Plant, 2001). Las partes del espectro que suelen tener más interés en los cultivos son el verde (500-550 nm), el rojo (600-700 nm) y el infrarrojo cercano (720-800 nm). Para facilitar el uso práctico de la información proporcionada por la reflectancia de las cubiertas vegetales se utilizan índices de vegetación que combinan en fórmulas matemáticas los valores de reflectancia para diferentes longitudes. Las longitudes de onda consideradas van a depender del aspecto que se quiere analizar. Uno de los más utilizados es el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) que es un buen indicador del estado de desarrollo de la vegetación, el estado nutricional y el estado sanitario del cultivo (Tucker, 1979). El NDVI se calcula a partir de la combinación de las bandas infrarroja y roja, su valor oscila entre -1 y 1, siendo los valores inferiores a 0 indicadores de agua y de cubiertas artificiales; valores entre 0 y 0,2 son debidos a suelos sin vegetación o vegetación seca, los valores por encima de 0,2 se refieren a cultivos que en función de su vigor pueden alcanzar diferentes valores, siendo 0,2 a 0,4 para poco vigor hasta valores de 1 donde el vigor es máximo.

La termografía infrarroja utiliza la reflectancia en el infrarrojo para cuantificar la temperatura de la cubierta vegetal y cuya aplicación más directa es detección remota del estrés hídrico, no detectable visualmente. Cuando se produce una situación de estrés hídrico se produce el cierre de los estomas reduciéndose la transpiración del cultivo, que tiene el efecto de refrigerar la vegetación, y como consecuencia, se incrementa la temperatura de la misma. Con un buen estado hídrico la temperatura de las hojas suele ser inferior a la temperatura ambiente entre 1 y 4 °C. Uno de los objetivos más perseguido por los investigadores de esta área es disponer de un indicador de estado hídrico cuantitativo basado en la temperatura de la cubierta, de forma que proporcione información no solo de si el cultivo sufre estrés hídrico sino también que cuantifique el nivel de estrés soportado (ligero, medio, severo...). Sin embargo, no se ha encontrado un indicador único, válido para todos los cultivos y situaciones, sino que es necesario desarrollar uno específico para cada especie y en ocasiones también para sistemas de cultivo. El índice más utilizado es el índice de estrés de cultivo (CWSI), siglas en inglés, que se calcula empleando la temperatura del cultivo, junto con la del aire y nos da un valor comprendido entre 0 y 1 (Jack-

son et al., 1981), cuanto mayor es el valor mayor es el grado de estrés que tienen el cultivo, los valores de estado hídrico sin estrés suelen estar comprendidos entre 0,2 y 0,5 dependiendo de los cultivos.

Un aspecto fundamental a tener en cuenta es que cualquiera de estas imágenes informa de la condición general de una parcela y sobre la presencia de zonas diferenciadas y orienta sobre el posible origen de estas diferencias, pero no se puede establecer con total seguridad una relación causa-efecto, por lo que siempre es recomendable un diagnóstico complementario “in situ”, pero en este caso dirigido hacia zonas concretas con lo que se gana en seguridad y eficiencia. Una vez realizado el diagnóstico conocer con precisión la superficie afectada es de gran utilidad para la actuación posterior (tratamiento, modificar abonado o riego, etc.). Un ejemplo claro es el incremento de temperatura en una zona de la parcela. El origen puede ser un déficit hídrico provocado por una avería o una mala programación, pero también una situación de asfixia radicular por exceso de agua (rotura de riego de larga duración) o el ataque de algún patógeno que afecte a los vasos conductores de la planta.

3. GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN

La introducción de una amplia gama de sensores en el campo ha tenido como consecuencia un incremento exponencial de la información disponible para el agricultor o técnico. La información puede ser muy útil para una buena toma de decisiones, pero puede llegar a ser abrumadora, transformándose en inútil cuando los beneficios que se perciben con su uso, no llegan a compensar el dinero y tiempo necesarios, o cuando no llegan a adaptarse a la sistemática de trabajo y nivel de formación del usuario. Desde el punto de vista de gestión de la información podemos distinguir cuatro pasos: adquisición de datos, interpretación, aplicación y evaluación.

3.1 Adquisición de los datos

La información se puede obtener con diferentes tipos de sensores y diferentes escalas, esto último es lo que se denomina plataforma. Las plataformas pueden clasificarse en tres niveles, de acuerdo con la distancia entre el sensor y el objetivo de interés: terrestre (Vehículos terrestres, muestreos puntuales); aéreo (aviones, helicópteros, drones, etc.); y orbital (naves espaciales, satélites artificiales, etc.) (Figura 1). Cada una de esas plataformas tiene unas características que las pueden hacer más o menos adecuadas en función de los objetivos.

Una de la plataforma que más atención ha recibido en los últimos años es el Dron, debido a su facilidad de manejo y la alta precisión de las imágenes que capta, inferiores a 5 cm en imagen visible, a 10 cm en imágenes espectrales y a 50 cm en el caso de imágenes térmicas, proporcionando al agricultor una buena perspectiva de su parcela.

Las plataformas terrestres pueden ser utilizadas, para efectuar medidas masivas georreferenciadas sobre la parcela. Una aplicación ya disponible a nivel comercial es la incorporación de sensores de reflectancia acoplados a tractores que permite realizar actividades muy diversas en el campo de forma dirigida como la aplicación de abono regulada de acuerdo a la información proporcionada a tiempo real por el sensor y la aplicación de herbicidas en focos de malas hierbas detectados con esta misma técnica.

FIGURA 1: Diferentes tipos de plataformas para adquisición de datos: terrestres (a) aéreos (b) y orbitales (c).



Otra fuente de información de importancia estratégica, es la que se obtiene con medidas puntuales, como puede ser el análisis de nutrientes en hoja, savia o clorofila, la medida de potencial hídrico foliar o de tallo, fenología, suelo sombreado, análisis de maduración, estimaciones de cosecha, etc., que pueden ser integradas con las imágenes y mapas para realizar los diagnósticos y toma de decisiones.

En función del coste y la precisión también se puede acceder a otras plataformas como son las imágenes satelitales de media y alta resolución. Las imágenes satelitales también aportan esta información con diferentes grados de precisión, siendo su coste variable. Por otra parte, hay que tener en cuenta que es necesario la compra de imágenes de una gran superficie de terreno (>1km²) (WorldView, Quidbird, Geoeye, entre otros), a no ser que se recurra a los satélites de acceso libre; satélites de Estados Unidos (Landsat) y de la Unión Europea (Sentinel) que con el desarrollo de plataformas que facilitan la obtención de las imágenes de una zona concreta están permitiendo que esta tecnología éste fácilmente disponible y de una manera gratuita. En el caso de los satélites europeos Sentinel2, los más adaptados a la agricultura, capturan imágenes de la reflectancia de los cultivos a diferentes longitudes de onda con una resolución de entre 10 y 30 metros, con una periodicidad de entre 7 y 10 días <https://scihub.copernicus.eu>. Otros satélites son Landsat 7 y 8 <https://landsat.usgs.gov>), su número de bandas es mayor que en el caso del Sentinel 2, teniendo además una banda térmica. Sin embargo, las resoluciones son más bajas siendo de 30 metros la banda con mayor resolución. Existen plataformas que integran la descarga de ambos sistemas de satélite, entre ellas podemos destacar Land Viewer (<https://lv.eosda.com>) y Remotepixel (<https://remotepixel.ca>) pudiendo complementar ambos satélites.

3.2 Procesado e interpretación

Los datos una vez adquiridos deben ser interpretados y analizados a una escala y frecuencia apropiadas, para que sean útiles para el usuario. Los datos obtenidos por los sensores y las imágenes obtenidas por drones y satélites deben ser guardadas en sistema de almacenamiento local y remoto, antes de ser procesarlas mediante diferente software de manejo de datos o sistemas de información geográfica (SIG). En este punto las TICs, que permiten captar, alma-

cenar y una fácil visualización de los datos y las técnicas de Big data, que facilitan el análisis de grandes volúmenes de datos, juegan un papel fundamental en la introducción de la tecnología en el campo. En este sentido son numerosas las Apps, softwares de control, plataformas webs y cuadernos de campo que existen en el mercado para visualizar las diferentes fuentes de datos captados por los diferentes sensores. Un paso más avanzado, todavía en fase de desarrollo, es lo que se denomina “riego inteligente” que utiliza la inteligencia artificial o lógica difusa en sistemas que aprenden con la información que se les proporciona, de forma que las decisiones que proponen son cada vez más certeras. La ventaja de estos dispositivos es su “amigabilidad” para que el agricultor o técnico pueda ver de forma rápida la información y realizar una actuación rápida ante un problema detectado. Sin el desarrollo de estas técnicas de gestión y procesamiento de datos, la tecnología no hubiera dado el salto desde los centros de investigación a las parcelas comerciales. Una buena aplicación no solo permite una fácil visualización de la información, sino que puede también orientar la interpretación presentando valores de referencia sobre estados adecuados o deficientes o establecer alarmas para llamar la atención sobre una actuación que debe tener carácter urgente. Por ejemplo, los valores obtenidos de las sondas de humedad de suelo son interpretados para indicar qué cambios son necesarios realizar en la programación de riego de la zona monitorizada. Los datos obtenidos con los sensores georeferenciados pueden combinarse con medidas masivas realizadas por otras plataformas (drones, satélites o sensores de CEa), creando diferentes capas que ayudan a que las recomendaciones sean más precisas. Los modelos de decisión pueden partir de modelos de cultivo sobre los que se puede actuar con información de diferentes fuentes y mediante cálculos y relaciones para llegar a una única recomendación, evitando así en muchos casos que la información sea contradictoria. Estos sistemas tienen el gran atractivo de integrar conocimientos y avances científicos en un modelo simplificado accesible para el agricultor o técnico, orientando la forma eficiente de realizar prácticas agronómicas como el riego o la fertilización.

Como ejemplo, en la figura 2a se muestran los mapas de porcentaje de nitrógeno en hoja en una parcela de tomate de industria. Se seleccionaron una serie de puntos de control a partir de un mapa de NDVI, estos se enviaron al técnico para realizar la toma de muestras, los datos obtenidos en laboratorio se correlacionaron con los datos de NDVI obteniendo un mapa del contenido de nitrógeno en la parcela, estableciendo que zona tenía un buen estado nutricional y cual no, a partir de valores de referencia obtenidos para el cultivo y el momento fenológico. Este mismo proceso se realizó con una cámara de presión portátil (PUMP-UP) con la que se obtuvo la medida de potencial hídrico de hoja (figura 2b) y se estableció qué zonas eran las que presentaban un estrés, en relación a los valores de referencia (manuales editados por CI-CYTEX) y como fue evolucionando a lo largo del ciclo de cultivo. La información final permitió al técnico realizar una corrección en la fertilización del cultivo y ajustar las dosis de riego.

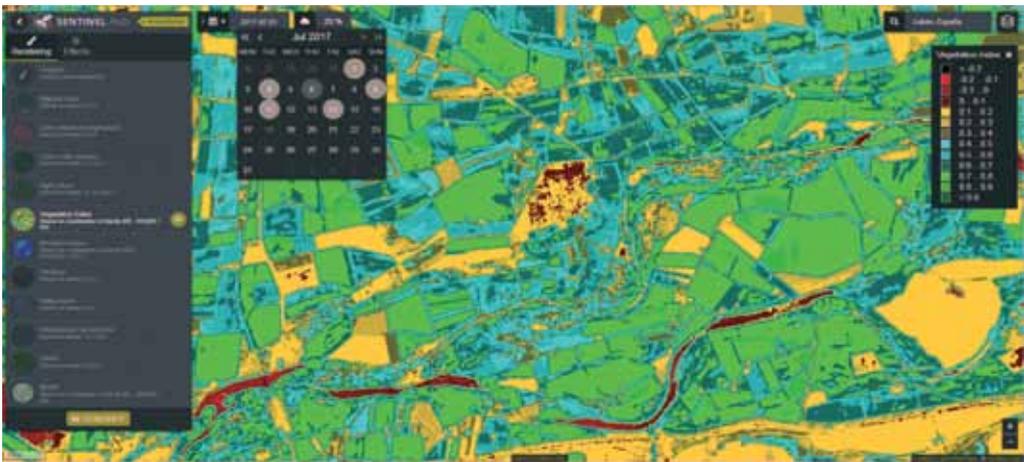
FIGURA 2: Mapa de contenido de nitrógeno en suelo (%N) (a) y mapa de potencial hídrico de hoja (B) en una parcela de tomate de industria de tomate de industria



Fuente: Proyecto nº A-E-11-0255-4 financiación ROMA SL, JUNTAEXTRMADURA y FEDER

Otra fuente importante de información son las diferentes plataformas web que permiten acceder a la información pública de forma fácil, como pueden ser los datos y predicciones meteorológicas, como la proporcionada por la red REDAREX en Extremadura, necesidades hídricas del cultivo o imágenes satelitales. Estas plataformas captan información de diferentes sensores y los procesan y analizan para ser utilizados por el usuario. Como ejemplos podemos destacar la plataforma de la Agencia Europea, desarrollada para hacer más accesible la información captada por los satélites Sentinel 2, donde se pueden ver las diferentes imágenes y los índices más comunes, de tal manera que el usuario en el móvil o en un ordenador pueda acceder a la última imagen de su parcela. En la figura 3, se observa una captura de pantalla de la plataforma sentinel Hub de la zona de Lobón (Badajoz). Los colores muestran los diferentes valores del NDVI. En la parte superior de la imagen se puede ver marcados en círculo de color gris en un calendario los distintos días en los que hay imágenes disponibles. Sin este sistema el usuario debería descargarse las imágenes y procesarlas en un SIG, lo que obligaría a una especialización.

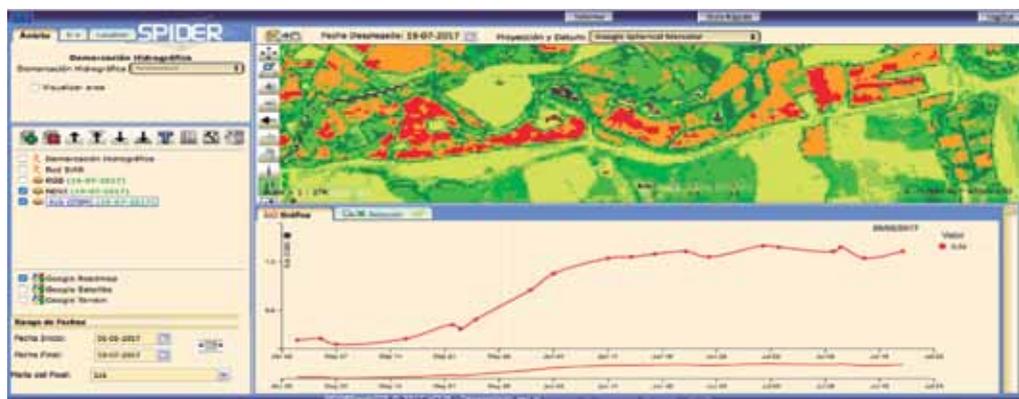
FIGURA 3: Visualización del índice NDVI con de imágenes sentinel 2



Fuente: <http://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground>

Otras plataformas, como SPIDER (figura 4), permiten analizar la información satelital y a partir de ajustes de NDVI permiten obtener los valores del coeficiente de cultivo que pueden ser utilizados por el usuario para ajustar las dosis de agua aplicadas al cultivo. El principal problema es que no proporciona la información de forma inmediata, sino que requiere un tiempo para obtención y procesado de la imagen. Sin embargo, puede ser complementaria de otras fuentes de información, como se ha comentado anteriormente.

FIGURA 4: Visualización del coeficiente de cultivo a partir de imágenes satelitales realizado por la plataforma SPIDER



Fuente: SPIDER (<http://www.spiderwebgis.org>).

3.3 Aplicación y evaluación

Por último y más importante, la información debe ser útil para realizar actuaciones que mejoren la gestión del cultivo. Esto puede ser proporcionando información a las diferentes máquinas e instalaciones, como por ejemplo a la maquinaria de precisión: abonadoras, sembradoras, máquinas de tratamiento o programadores de riego, siempre manteniendo un nivel de control por parte del usuario. Otra opción es proporcionar una base de datos al técnico para planificaciones tanto inmediatas como a medio plazo. En este caso los formatos en los que se presente serán clave, así con las herramientas informáticas que hagan posible la integración de las diferentes fuentes de información.

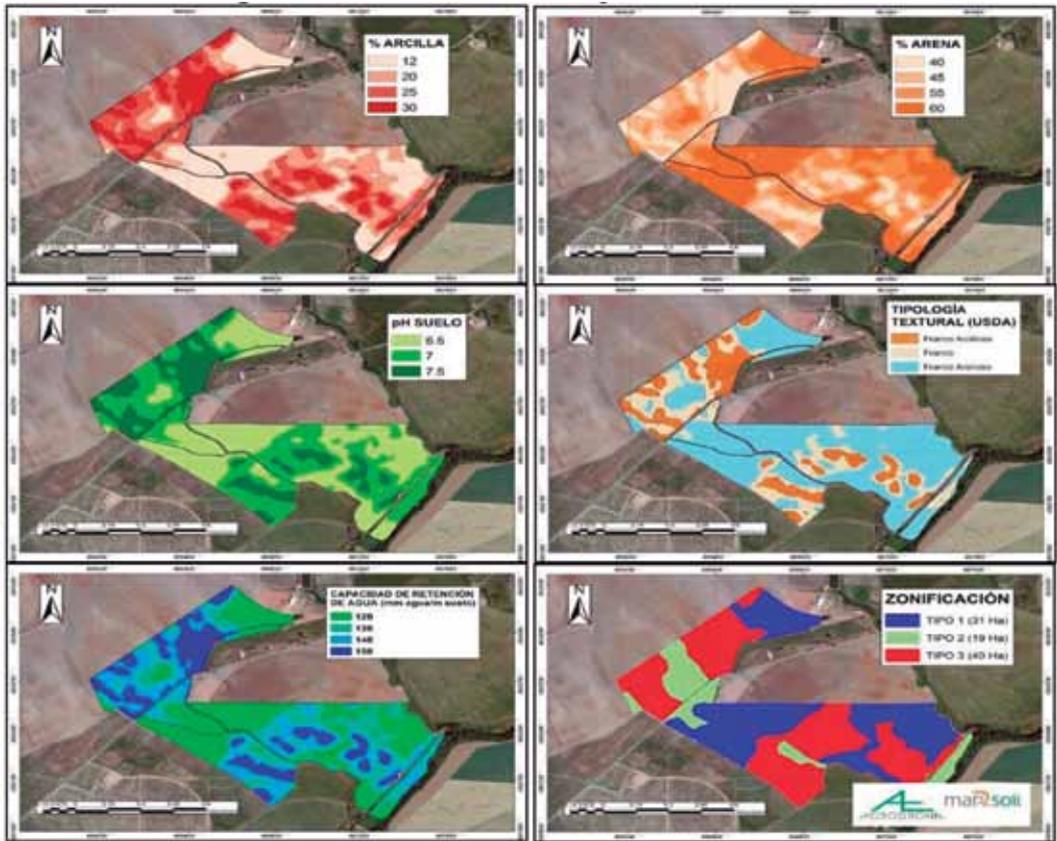
4. CASOS PRÁCTICOS

A continuación, se muestran algunos casos prácticos en los que se están utilizando diferente tecnología para dirigir la ejecución de algunas prácticas de cultivo:

4.1 Diseño eficiente de la instalación de riego

Los mapas de CEa resultan útiles para simplificar y mejorar los estudios iniciales del terreno necesarios para el diseño agronómico de las instalaciones de riego. En la figura 5 se muestra un ejemplo del sistema Map2Soil (desarrollado por AGRODRONE) que se basa en esta tecnología. A partir del mapa de CEa de la parcela se realiza un muestreo de suelo dirigido, que con el correspondiente análisis en laboratorio, proporciona información detallada de los tipos y distribución de los suelos, básico para el diseño de la instalación con una zonificación de sectores adaptada al terreno con terrenos lo más homogéneos posibles.

FIGURA 5: Mapas caracterización edafológica desarrollados con sistema M2S



Fuente: AGRODRONE, S.L.

El beneficio es un diseño hidráulico más certero que hace posible una aplicación más uniforme de agua y fertilizantes en cada uno de los sectores, con un diseño y adaptada a las necesidades del conjunto de la parcela.

4.2 Riego inteligente

Mejorar el día a día de la gestión de riego también es posible gracias a la tecnología actual. Por ejemplo, el modelo de automatización de riego IRRIX (Casadesús et al, 2012) que se encuentra aún en fase experimental, propone una programación automatizada del riego. Parte de una programación de campaña, previa al inicio de la misma, en la que el agricultor plantea sus objetivos (riego de acuerdo a necesidades hídricas, uso de estrategias de riego deficitario, etc.) y condicionantes (disponibilidad de agua) y el sistema, de forma autónoma establece la frecuencia de riego y la duración de los mismos. Esto es posible gracias a la integración de un

modelo de estimación de necesidades hídricas del cultivo según el método propuesto por la FAO, junto los conocimientos agronómicos sobre el cultivo en cuestión, con la combinación de sensores de humedad de suelo que permiten al sistema detectar como está influyendo la programación de riego en el contenido de agua en el suelo y realizar ajustes automáticos. El propio sistema realiza de forma automática la apertura y cierre de válvulas y recoge y procesa la información que necesita para la toma de decisiones (datos climáticos, datos de las sondas de humedad, volúmenes de agua de riego reales). En la figura 6 se muestra la pantalla de seguimiento de las parcelas del sistema IRRIX de olivo y ciruelo japonés, donde se indica el estado actual del riego en la parcela y las recomendaciones de tiempo de riego que el sistema está mandando a las electroválvulas. En estos mismos gráficos aparece en la esquina superior derecha indicaciones para el usuario indicando si todo funciona correctamente (círculo verde) si hay algún problema leve (círculo amarillo) o si es grave (círculo rojo).

FIGURA 6: Pantallas de seguimiento de las distintas parcelas en el sistema IRRIX



Fuente: proyecto de investigación “Aplicación del riego de precisión a la gestión automatizada del agua en parcelas de cultivos leñosos RTA2013-00045-C04” financiado por INIA y FEDER

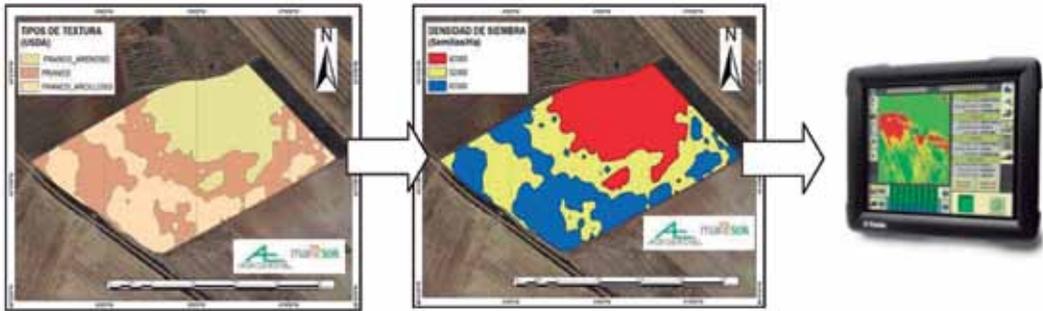
Los iconos debajo del círculo indican el tipo de problema para facilitar la intervención necesaria para solventarlo. Se trata de un sistema “inteligente” en que la información captada es utilizada por el sistema para “aprender” de forma que el sistema se autoajusta y mejorado con el tiempo.

4.3 Aplicaciones de siembra variable

Como hemos visto anteriormente la VE del suelo afecta a la capacidad productiva de las distintas zonas de la parcela: suelos bien estructurados y con capacidad para almacenar de manera adecuada agua y nutrientes presentan un potencial productivo mayor.

Esta circunstancia se pone de relieve en mayor medida en cultivos de secano. En la figura 7 se muestra la caracterización textural de una parcela destinada a cultivo de girasol, donde los suelos más “pesados” con mayor capacidad para retener el agua y nutrientes, presentan un potencial productivo mayor y, por tanto, son capaces de asumir un mayor volumen de planta.

FIGURA 7: Caracterización de la tipología textural del terreno (a), mapa de siembra variable (b) pantalla de control (Trimble) de la sembradora (c).



Fuente: AGRODRONE, S.L.

Esta hipótesis se confirma cuando estos mapas se contrastan con los de desarrollo del cultivo, y sobre todo, con los mapas de cosecha. Es importante tener en cuenta que estas tecnologías permiten un mejor conocimiento de las parcelas, lo que supone mejoras a corto, medio y largo plazo.

4.4 Fertilización inteligente

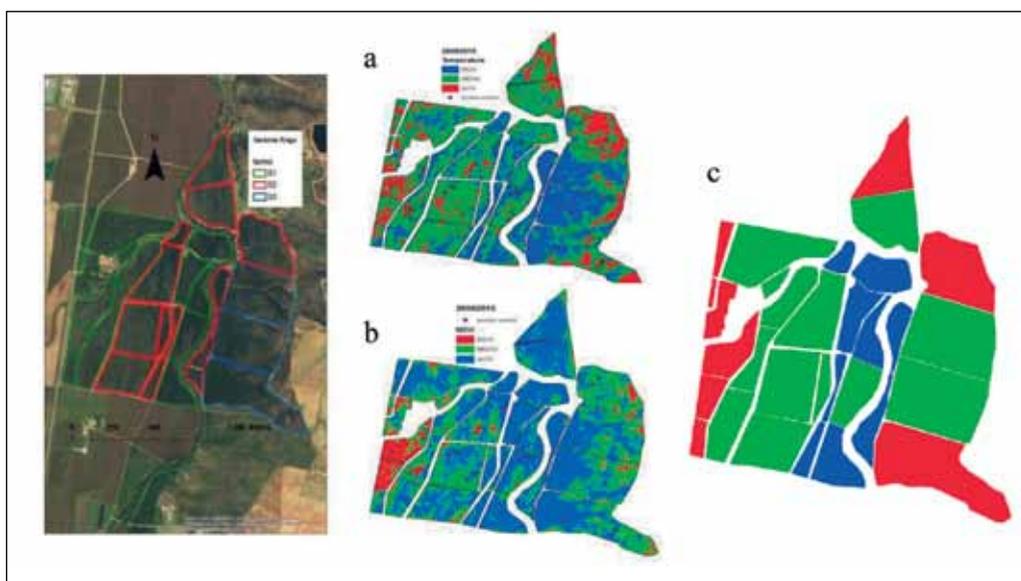
Para la fertilización de precisión se pueden utilizar diferentes sistemas para medir la variabilidad de la parcela. Medidas de la variabilidad del suelo combinados con análisis de suelo dirigidos, a partir de los cuales y correlacionándolos con una medida masiva como es la CEa, se puede realizar mapas de disponibilidad de nutrientes que sirven para dirigir la dosis de aplicación de las abonadoras de precisión capaces de modificar en continuo las dosis de aplicación. No hace falta insistir sobre los ahorros y beneficios medioambientales que supone una fertilización precisa.

4.5 Evaluaciones del estado hídrico de los cultivos

El riego tiene como principal objetivo evitar parcial o totalmente situaciones de estrés hídrico en los cultivos con el objetivo de incrementar la producción y mejorar la calidad. Aunque en diferentes cultivos se ha demostrado que es beneficioso inducir periodos de estrés para obtener beneficios en la calidad, controlar el vigor de las plantas o mejorar la eficiencia en el uso del agua, siempre se trata de generar condiciones de “no estrés” o “estrés controlado”. Para saber si estamos cumpliendo con nuestros objetivos es interesante conocer el estado hídrico del cultivo y disponer de medidas cuantitativas que nos permitan determinar numéricamente estas situaciones (no estrés, estrés ligero, moderado o severo). Los mapas térmicos proporcionan información sobre las zonas de la parcela que experimentan mayor o menor nivel de estrés y si se utiliza un índice normalizado para el cultivo en cuestión podemos llegar a cuantificar esas diferencias. La figura 8a muestra un mapa térmico de un olivar comercial en el que se indican los diferentes sectores de riego. En este mapa se diferencian zonas con mejor y peor estado

hídrico, a pesar de tener una misma estrategia de riego en todo el olivar. Si observamos la figura 8b podemos comprobar que las zonas con mejor estado hídrico (temperaturas más bajas) tienen más desarrollada la vegetación (mayores índices de NDVI). Esta información permite clasificar los sectores de riego existentes en función del desarrollo y estado hídrico para hacer una programación adaptada a cada uno de ellos (figura 8c). Este es un buen ejemplo de la necesidad de complementar esta información con la obtenida en el campo, o bien completarla con información complementaria (mapas de suelo, usos anteriores del suelo, orografía), ya que estas imágenes informan de la situación, pero no de las causas que la provocan.

FIGURA 8: Determinación del estado hídrico en olivar superintensivo y adecuación a los sectores de riego en función de la temperatura del cultivo



Fuente: Proyecto RTA2012-00018-C02 financiación INIA y FEDER

5. CONCLUSIONES

La tecnología hoy en día juega un papel fundamental en la modernización de la agricultura. Las oportunidades son inmensas y pueden ayudar a manejar de forma más eficiente el cultivo. Los estudios de VE y el uso de sensores están siendo ofertados por numerosas empresas con desarrollos que tratan de adaptarse a las necesidades del usuario. Es importante que el agricultor sepa seleccionar el servicio que le proporcione una información útil, que le permita mejorar respecto de su situación de partida y que esa mejora compense la inversión necesaria en tiempo y dinero. Objetivos demasiado ambiciosos, puede conllevar pérdidas económicas y con ello frustración y desconfianza en la tecnología.

Para evitar los problemas que surgen y los recelos en la adopción de la tecnología, los centros de investigación extremeños pueden jugar un papel fundamental. En CICYTEX se desarrollan junto con proyectos de investigación en esta línea, el proyecto estratégico AGROS (Sostenibilidad de las producciones hortofrutícolas en los regadíos de Extremadura) y el proyecto FERTINNOWA cuyos objetivos incluyen esta labor de asesoramiento en la introducción de innovaciones en las empresas agrarias.

BIBLIOGRAFÍA

- Casadesús, J., Mata, M., Marsal, J., Girona, J. (2012). A general algorithm for automated scheduling of drip irrigation in tree crops. *Comp. Electron. Agric.*, 83, 11-20.
- FAO (1996) Enseñanzas de la revolución verde: hacia una nueva revolución verde <http://www.fao.org/docrep/003/w2612s/w2612s06.htm>.
- Fortes, R., Millán, S., Prieto, M. H., Campillo, C. (2015). A methodology based on apparent electrical conductivity and guided soil samples to improve irrigation zoning. *Precision Agriculture*, 16, 441–454.
- Gómez-Miguel, V. D., Sotés, V., & González-SanJosé, Y. M. L. (2017). Teledetección no es Tele-adivinación: La importancia de las causas en Viticultura de Precisión. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 9, p. 01022).
- Jackson RD, Idso SB, Reginato R, Pinter PJ. (1981) Canopy temperature as a drought stress indicator. *Water Resour Res* 17:1133–1138
- Kitchen NR, Sudduth KA, Drummond ST. (1999) Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils. *J Prod Agric*;12:607–617
- Kitchen NR, Sudduth KA, Myersb DB, Drummonda ST, Hongc SY. (2005) Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Comp. Electron. Agric.* 2005;46(1-3):285–308.
- Pierce, F. J., Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. *Advances in agronomy*, 67, 1-85.
- Plant, R. E. (2001). Site-specific management: The application of information technology to crop production. *Comp. Electron. Agric.*, 30(1-3), 9-29.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing Environ.*, 8(2), 127-150.

