

Agricultura

Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura 16

# Ahorro y Eficiencia Energética

## en la Agricultura de Precisión



MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO

IDA E Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía



*Agricultura*

# Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura de Precisión



## TÍTULO

Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura de Precisión

## CONTENIDO

Esta publicación ha sido redactada para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) por un equipo de las Universidades de Valladolid y Politécnica de Madrid formado por: Luis Manuel Navas Gracia, Fernando González Herrero, Jaime Gómez Gil, Gonzalo Ruiz Ruiz, Pilar Barreiro Elorza, Dionisio Andújar Sánchez, Belén Diezma Iglesias, Eva Báguena Isiegas y Miguel Garrido Izard, coordinados por Constantino Valero Ubierna.

Foto de portada: Autonomous Mechanisation System (AMS) del Centre for Precision Farming, University of Copenhagen.

.....  
Esta publicación está incluida en el fondo editorial del IDAE, en la serie “Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura”.

Cualquier reproducción, total o parcial, de la presente publicación debe contar con la aprobación del IDAE.

ISBN: 978-84-96680-51-7

.....

### **IDAE**

**Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía**

**c/ Madera, 8**

**E - 28004 - Madrid**

**comunicacion@idae.es**

**www.idae.es**

Madrid, junio 2010

# Índice

Página

<b>Prólogo . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>1 La agricultura de precisión . . . . .</b>	<b>9</b>
1.1 Conceptos básicos e historia . . . . .	9
1.2 Implicaciones socioeconómicas y medioambientales de la agricultura de precisión . . . . .	17
1.3 Técnicas empleadas en la agricultura de precisión . . . . .	20
<b>2 Ahorro y eficiencia energética derivados del control electrónico en tractor . . . . .</b>	<b>35</b>
2.1 Ahorro de combustible en el tractor usando técnicas de agricultura de precisión . . . . .	35
2.2 Control de rodada ( <i>controlled traffic farming</i> ) empleando técnicas de agricultura de precisión . . . . .	42
<b>3 Ahorro y eficiencia energética derivados de los sistemas de ayuda al guiado de tractores y maquinaria agrícola . . .</b>	<b>47</b>
3.1 Fundamentos de guiado . . . . .	47
3.2 Análisis de ahorro y eficiencia energética derivados de los sistemas de ayuda al guiado . . . . .	50
<b>4 Ahorro y eficiencia energética derivados de nuevas tecnologías de siembra. . . . .</b>	<b>57</b>
4.1 La siembra directa con agricultura de precisión . . . . .	57
4.2 Conclusiones . . . . .	63
<b>5 Ahorro y eficiencia energética derivados de nuevas tecnologías de control localizado de malas hierbas . . . .</b>	<b>65</b>
5.1 Introducción. . . . .	65
5.2 Detección de las malas hierbas . . . . .	66
5.3 Aplicación de tratamientos localizados contra las malas hierbas . . . . .	67

<b>6 Ahorro y eficiencia energética derivados de nuevas tecnologías de abonado . . . . .</b>	<b>73</b>
6.1 Introducción . . . . .	.73
6.2 Adquisición de información relativa al abonado diferencial . . . . .	.74
6.3 Sistemas para la aplicación diferencial de fertilizantes: tecnologías de dosis variable . . . . .	.79
6.4 Consideraciones económicas . . . . .	.80
<b>7 La recolección empleando técnicas de agricultura de precisión . . . . .</b>	<b>81</b>
7.1 La batería de sensores . . . . .	.81
7.2 Un buen resultado requiere una correcta calibración y mantenimiento . . . . .	.83
7.3 Errores a corregir en el mapa de producción . . . . .	.84
7.4 Los costes de elaboración de mapas . . . . .	.84
7.5 ¿Hay lugar para el ahorro?. . . . .	.85
7.6 Un paso más en la eficiencia: la integración de señales y sistemas. . . . .	.86
<b>8 Resumen en el uso de las principales técnicas de agricultura de precisión. . . . .</b>	<b>89</b>
<b>Reglas Clave . . . . .</b>	<b>97</b>
<b>Bibliografía . . . . .</b>	<b>99</b>

# Prólogo

La agricultura de precisión está en constante desarrollo; las líneas de investigación e innovación son muy activas en este sector, se realizan mediciones y proyectos demostrativos para estudiar la viabilidad o no de aplicación de estas técnicas a los insumos del proceso productivo agrícola (semillas, fertilizantes, pesticidas, etc.).

Este conjunto de técnicas cuenta ya con casi tres décadas de desarrollo. Es suficiente como para que nuestros agricultores se planteen la posibilidad de aplicarlas en sus explotaciones y conseguir reducir costes, mejorar la rentabilidad de sus cultivos y disminuir el impacto ambiental. Esta publicación pretende acercar al lector las diferentes tecnologías de la agricultura de precisión, con objeto de establecer criterios útiles para su adopción.

En los primeros capítulos se explican los conceptos fundamentales de la agricultura de precisión, se revisa su breve historia y se justifica su evolución. Además se exponen los fundamentos de algunas técnicas comúnmente empleadas, para que el lector pueda evaluar con mejor criterio sus posibilidades de uso.

En capítulos posteriores se analizan las posibilidades de ahorro energético y de insumos aplicando la agricultura de precisión a ámbitos concretos de la agricultura. Así, se tratan temas como el ahorro de combustible en el tractor mediante el análisis de sus parámetros de funcionamiento almacenados electrónicamente, o las ventajas del establecimiento de sistemas de control de rodadas.

Un capítulo de mucha actualidad está dedicado íntegramente a los sistemas de ayuda al guiado y guiado automático de tractores. El lector agradecerá la abundancia de datos reales contenidos en el mismo, de gran valor para realizar cálculos de ahorro.

El capítulo de siembra está orientado hacia la agricultura de precisión aplicada a la siembra directa, dado que es en esa dirección hacia donde apuntan los nuevos desarrollos, y son más claros los ahorros energéticos derivados.

Le sigue un capítulo explicativo sobre el manejo diferencial de malas hierbas, y por tanto de pulverización con agricultura de precisión.

El capítulo de abonado pretende hacer reflexionar al lector sobre la asociación necesaria entre abonadoras de dosis variable y los modernos sistemas de análisis de suelo en tiempo real, con sus posibilidades de aplicación.

Hasta hace poco, el tema de la recolección no ha sido entendido en el ámbito de la agricultura de precisión como una oportunidad para ahorrar insumos.

Finalmente, se intenta dar al lector una serie de recomendaciones a través de un resumen sobre el uso de las técnicas de la agricultura de precisión, y unas breves reglas claves.

Quizá se eche en falta algún tema, especialmente uno dedicado a las implicaciones que la agricultura de precisión puede tener en el laboreo. Se mencionan soluciones actuales aportadas por la agricultura de precisión a la labranza en capítulos como los dedicados a malas hierbas, siembra, guiado, etc. No obstante, el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) ya dispone de excelentes monográficos sobre este tema, cuya esencia es plenamente aplicable al caso de la labranza con tecnologías de agricultura de precisión. La única diferencia radicaría en que las nuevas tecnologías permiten llevar a la práctica soluciones (por ejemplo, reducir la profundidad de labor) de forma automática y controlada por sensores.



El IDAE tiene un conjunto de actuaciones encaminadas al ahorro de energía y a la diversificación energética a través de fuentes renovables. Estas medidas están agrupadas en el Plan de Energías Renovables 2005-2010 y la Estrategia de Eficiencia Energética en España desarrollada mediante sus Planes de Acción 2005-2007 y 2008-2012.

Dentro de estos Planes de Acción, y conscientes de que el agricultor, ganadero y pescador puede tener una incidencia en el ahorro energético consiguiendo paralelamente un ahorro económico para su explotación, el IDAE, siempre contando con la colaboración del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, está realizando una serie de acciones en materia de formación, información y difusión de técnicas y tecnologías de eficiencia energética en el sector. Una de estas acciones es el desarrollo de una línea editorial en materia de eficiencia energética en el sector agrario mediante la realización de diversos documentos técnicos, como el que se presenta, donde se explican los métodos de reducción del consumo de energía en la diferentes tareas agrícolas.

Con este ya se han publicado y están disponibles en nuestra página web ([www.idae.es](http://www.idae.es)), los diecisiete primeros documentos de esta línea editorial:

- Tríptico promocional: “Medidas de Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura”.
- Documento especial (coeditado con el MAPA): “Consumos Energéticos en las Operaciones Agrícolas en España”.
- Documento nº 1: “Ahorro de Combustible en el Tractor Agrícola”.
- Documento nº 2: “Ahorro y Eficiencia Energética en Agricultura de Regadío”.
- Documento nº 3: “Ahorro y Eficiencia Energética en Instalaciones Ganaderas”.
- Documento nº 4: “Ahorro, Eficiencia Energética y Sistemas de Laboreo Agrícola”.
- Documento nº 5: “Ahorro, Eficiencia Energética y Estructura de la Explotación Agraria”.
- Documento nº 6: “Ahorro, Eficiencia Energética y Fertilización Nitrogenada”.
- Documento nº 7: “Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos”.

- Documento nº 8: “Protocolo de Auditoría Energética en Invernaderos. Auditoría energética de un Invernadero para cultivo de flor cortada en Mendi-gorría”.
- Documento nº 9: “Ahorro y Eficiencia Energética en las Comunidades de Regantes”.
- Documento nº 10: “Protocolo de Auditoría Energética en Comunidades de Regantes”.
- Documento nº 11: “Ahorro y Eficiencia Energética en los Cultivos Energéticos y Agricultura”.
- Documento nº 12: “Ahorro y Eficiencia Energética con Agricultura de Conservación”.
- Documento nº 13: “Ahorro y Eficiencia Energética en Buques de Pesca”.
- Documento nº 14: “Auditorías energéticas en instalaciones ganaderas. Parte 1: Manual para la realización de las auditorías.”
- Documento nº 15: “Auditorías energéticas en instalaciones ganaderas. Parte 2: Protocolo para la realización de auditorías energéticas en instalaciones ganaderas y ejemplos de auditorías en cuatro instalaciones”.

Todas las medidas del Plan de Acción 2008-2012 son desarrolladas en colaboración con las CCAA, de ahí la importancia de que ellas también se den cuenta que el uso racional de la energía deberá formar parte de todas las decisiones que afecten al sector agrícola. Y es de vital importancia que los programas públicos de apoyo incorporen la eficiencia energética como un elemento prioritario, partiendo de la formación de formadores y agentes, y primando aquellos equipos más eficientes.



# 1 La agricultura de precisión

---

## 1.1 Conceptos básicos e historia

### 1.1.1 Justificación de la agricultura de precisión

Desde hace 5.000 años el hombre trabaja la tierra, y ha pasado de recoger los frutos de la naturaleza con un esfuerzo mínimo a tener que hacerlo en la actualidad con el empleo de gran cantidad de recursos. Mediante la agricultura y la ganadería, el ser humano obtiene y aprovecha los productos que ofrecen las plantas y los animales, y lo hace hoy en día para alcanzar diversos fines, como conseguir una mayor cantidad de alimentos, mejorar y estabilizar su calidad, asegurar su continuidad en el tiempo, aumentar su variedad y, en general, atender las necesidades de la alimentación de una población en crecimiento constante y cada vez con mayor conciencia social y medioambiental.

La evolución de las actividades agropecuarias ha sido muy lenta, e incluso se han producido involuciones en ella, a veces durante períodos de tiempo muy largos. Así, del elevado nivel alcanzado por los romanos en la agricultura, se pasó por un período muy prolongado en el medioevo, durante el cual no sólo no se avanzó, sino que la tecnología agrícola sufrió una vuelta atrás muy sensible. Sin embargo, fue a finales del siglo XIX cuando una pléyade de científicos y hombres ilustrados se propuso establecer las bases de una nueva agricultura, aprovechando para ello el avance científico y tecnológico de aquel entonces. De esta forma, con el *dry-farming* se combatió con éxito los problemas planteados por la utilización abusiva e inconsciente del suelo, como son la erosión, la falta de materia orgánica y la gestión técnica deficiente. Fue también en esta época cuando se dieron cuenta que la conservación del agua y el control de la fertilidad del suelo no se solucionaba con el barbecho, tal y como se había hecho hasta principios del siglo XX, sino con una rotación racional de cultivos, unas alternativas amplias y variadas, la utilización de especies y variedades resistentes a la sequía, el empleo del barbecho semillado, una utilización muy estudiada de los fertilizantes y la lucha eficaz contra las malas hierbas, las plagas y las enfermedades.

En los albores del siglo XX los problemas existentes en la producción de alimentos eran graves, pero se abrían nuevas posibilidades científico-técnicas para solucionarlos. Los avances en el conocimiento de la nutrición vegetal y su control por medio de fertilizantes orgánicos y químicos, de la lucha contra los enemigos de las plantas cultivadas y contra los meteoros adversos, de la utilización de las semillas y plantas de vivero resistentes a la sequía, a los parásitos y a las temperaturas desfavorables, así como el conocimiento de los fenómenos fisiológicos (el fotoperíodo y el termoperíodo, fundamentalmente), dieron una relativa esperanza para lograr una agricultura que cubriera las necesidades de la humanidad.

En la búsqueda de este mismo objetivo, durante las dos últimas décadas del siglo pasado, y coincidiendo con el avance de la sociedad de la información, la agricultura ha acusado un tremendo cambio en todo su entorno, especialmente tecnológico (aplicación de avances informáticos, electrónicos y de telecomunicaciones), pero con derivaciones sociales (especialmente por la escasez y carestía de la mano de obra, y la demanda de un mayor nivel de vida de la población rural), económicas (control económico de los rendimientos) y hasta políticas (importancia de las transacciones agrícolas en la política europea y mundial). Así, con diversos planteamientos y justificando diferentes fines, surge en esta época una agricultura avanzada que se denomina Agricultura de Precisión (AP), como una respuesta de la agronomía a la necesaria gestión diferencial de los cultivos agrícolas.

Técnicamente, con la agricultura convencional y durante la segunda mitad del siglo XX, se estudiaron con profundidad las propiedades químicas del suelo así como sus condiciones físicas. De esta manera, se determinaron las ventajas que podían aportar la agrología y la edafología mediante la elaboración de mapas de suelos, que permitían dar un tratamiento diferencial adecuado a las explotaciones agrícolas para conseguir un cultivo óptimo. En esta época, y aunque se continuaron las investigaciones sobre las propiedades del suelo y la variabilidad de los rendimientos de los cultivos, la mecanización de la agricultura y la tendencia

a incrementar la dimensión de los aperos condujo a la explotación del suelo sobre mayores superficies y a la eliminación del tratamiento diferencial de las parcelas.

Fue a partir de 1980 cuando la ingeniería agronómica, especialmente en Estados Unidos de Norteamérica y Canadá, comenzó a estudiar esta problemática de la homogenización de los tratamientos, con la finalidad de definir sistemas que pudieran responder a las variaciones de las condiciones de las fincas, para establecer los correspondientes cambios en la cantidad de insumos, tales como fertilizantes o herbicidas, aplicados a cada punto de una parcela. Así, a principios de la década de los ochenta del siglo pasado, Krishnan y sus colaboradores desarrollaron un sensor de materia orgánica como parte de un sistema para la aplicación de dosis variables de herbicidas. En 1983, Rudolph y Searcy contemplaron la posibilidad de utilizar un equipo que pudiese controlar la aplicación de dosis diferenciales de fertilizantes, herbicidas e insecticidas, basado en mapas de situación en campo, archivados en un ordenador a bordo del tractor. A partir de la década de los noventa, los avances tecnológicos y el interés por todo lo relacionado con el medio ambiente han incrementado la importancia de definir pequeñas unidades de gestión para aplicar en ellas los insumos según las características individuales y variables de cada unidad. Tener en cuenta esta variabilidad en el manejo de los cultivos implica usar como base del razonamiento aquellas zonas en el interior de la parcela que presentan características diferenciadas. Es lo que se conoce como variabilidad intraparcularia, concepto fundamental y pilar básico en el que se basa la AP.

No obstante, la mayor dificultad estriba actualmente en la adecuada identificación de las zonas con variabilidad dentro de una misma parcela y en la toma de decisiones correctas en base a la misma. En este sentido, las nuevas tecnologías utilizadas por la AP pretenden sustituir la inspección visual humana en la identificación de la variabilidad por sistemas como el GPS (*Global Positioning System*) y los SIG (Sistemas de Información Geográfica), el empleo de captadores y la utilización de imágenes tomadas por cámaras en el espectro visible (visión artificial) o imágenes captu-

radas por espectroradiómetros montados sobre equipamientos de tierra, plataformas aéreas o satélites (teledetección), entre otras herramientas.

Con todo, la AP se muestra como una de las mejores herramientas a utilizar en los sistemas productivos del tercer milenio con el fin de conseguir la optimización de los inputs, la reducción de los costes medioambientales, el incremento de la precisión en la producción y la incorporación de la trazabilidad en todo el proceso, término éste de creciente demanda por parte del consumidor y la legislación en general. Sin embargo, existen todavía tres importantes barreras técnicas que deben ser solucionadas antes de su plena implementación:

- 1 La AP implica una intensificación de la información. La elaboración de mapas de suelos, cultivos, rendimientos y factores ambientales que afectan a la producción final genera un elevado volumen de información, que junto con los conocimientos propios derivados de la experiencia, las variabilidades climáticas y las exigencias del mercado, hacen imprescindible el desarrollo de herramientas de integración de la información y sistemas expertos de soporte a las decisiones, debiendo éstos presentar unas condiciones de estandarización de datos y transferencia de información adecuados.
- 2 Se observa actualmente un déficit en cuanto a los criterios de selección de los procedimientos racionales a aplicar y las estrategias a seguir para la determinación de las necesidades basadas en la variabilidad intraparcularia, así como una ausencia de validaciones científicas en cuanto a los beneficios generados. Estas deficiencias deben apoyarse en análisis detallados del suelo y del cultivo, así como en trabajos de investigación y experimentación agronómica.
- 3 La obtención de datos relativos al suelo, cultivo y condiciones ambientales en general resulta todavía una labor costosa en tiempo e inversión. Es preciso el desarrollo de sistemas sensores capaces de generar de forma precisa, rápida y barata la información necesaria.

En España, la AP se encuentra aún en fase de desarrollo embrionario, por lo que todavía no se dispone de cifras significativas de su aplicación en explotaciones reales para tomar una clara postura sobre su rentabilidad. Lo que sí es posible es realizar un examen de los criterios que han de ser tenidos en cuenta a la hora de intentar aplicar las tecnologías de la AP en nuestras condiciones agronómicas. Así, la inversión requerida para la puesta en marcha de desarrollos propios de la AP en una explotación difícilmente se materializan en una disminución de los costes productivos. Y esto es debido, entre otros, a los siguientes motivos:

- Su adopción implica profundos cambios en los procesos de manejo de determinadas operaciones, lo que presupone nueva formación o reciclado por parte del agricultor.
- La introducción de estas tecnologías debe llevarse a cabo en etapas sucesivas y de manera progresiva.
- Los beneficios económicos resultantes raramente pueden estimarse de una única manera, ya que son de naturaleza diferente (ahorro directo de fitosanitarios, abonos o semillas, incremento de cosecha, mejoras en la gestión de los equipos o menores índices de contaminación).
- Resulta difícil, más que en otros casos, evaluar la evolución de los costes y los beneficios a medio y largo plazo.

Por lo que respecta a las dimensiones adecuadas de las parcelas para la implementación de la tecnología propia de la AP, es evidente la dificultad que comporta su incorporación a una agricultura minifundista como la española, y no solo desde el punto de vista de superficie anual a trabajar, con el lógico desplazamiento del umbral de rentabilidad de la inversión, sino que desde el punto de vista operacional, el hecho de disponer de parcelas de dimensiones reducidas dificulta, e incluso impide, la subdivisión de las mismas en zonas de necesidades y/o características diferentes. Además, la cada vez mayor anchura de trabajo de las máquinas obliga a disponer de parcelas en las cuales el número de pasadas sea importante, con el fin de poder realizar la modulación de las aportaciones en

un espacio mínimamente amplio. Por ello, se entiende que, si bien puede resultar difícil la justificación de la incorporación de equipos de AP en una explotación individual, salvo escasas excepciones, no lo es tanto el hecho de pensar en su utilización por parte de empresas de servicios y cooperativas.

### 1.1.2 Conceptos fundamentales de la agricultura de precisión

La Agricultura de Precisión (AP) o Agricultura de Gestión Integrada (AGI) es una disciplina que propugna, tal y como se ha comentado anteriormente, la adaptación de las técnicas de cultivo a las condiciones de cada punto del terreno, teniendo en cuenta además las necesidades de las plantas y la imprescindible optimización de la utilización de insumos, para conseguir un cultivo rentable y racional en zonas pequeñas de una misma explotación agrícola.

De entre las definiciones existentes sobre la AP destaca, por su concreción y simplicidad, aquella según la cual la AP es “efectuar la intervención agrícola correcta, en el momento adecuado y en el lugar preciso”. La AP tiene por ello en cuenta la variabilidad intraparcelaria, por lo que cuando se ha de desencadenar una actuación modular propia de la AP, la toma de decisiones debe considerar previamente la heterogeneidad existente dentro de la parcela.

Por ello, la regulación de los equipos adaptados a la AP está basada en tres etapas, las cuales constituyen el bucle básico de la AP:

A Una primera fase de identificación cuantitativa y cualitativa de la variabilidad (fase de determinación), agrupando las zonas en base a su homogeneidad para una determinada operación cultural. En esta fase, los diferentes tipos de captadores son los dispositivos encargados de analizar las características diferenciales de cada zona. Los datos así obtenidos pasarán a formar parte de la base de datos utilizada en posteriores actuaciones.

B Una segunda fase de análisis del impacto agronómico que una actividad diferenciada en cada zona

puede generar (fase de análisis). En esta etapa, los avanzados sistemas informáticos van a permitir la utilización correcta de estas bases de datos y, juntamente con modelos agronómicos adecuados, establecer las características diferenciales para la regulación de los equipos.

C Una tercera fase de ejecución modular de las diferentes operaciones (fase de actuación), para lo que serán necesarios elementos capaces de variar en continuo la regulación de las máquinas para la realización de un aporte modular de insumos.

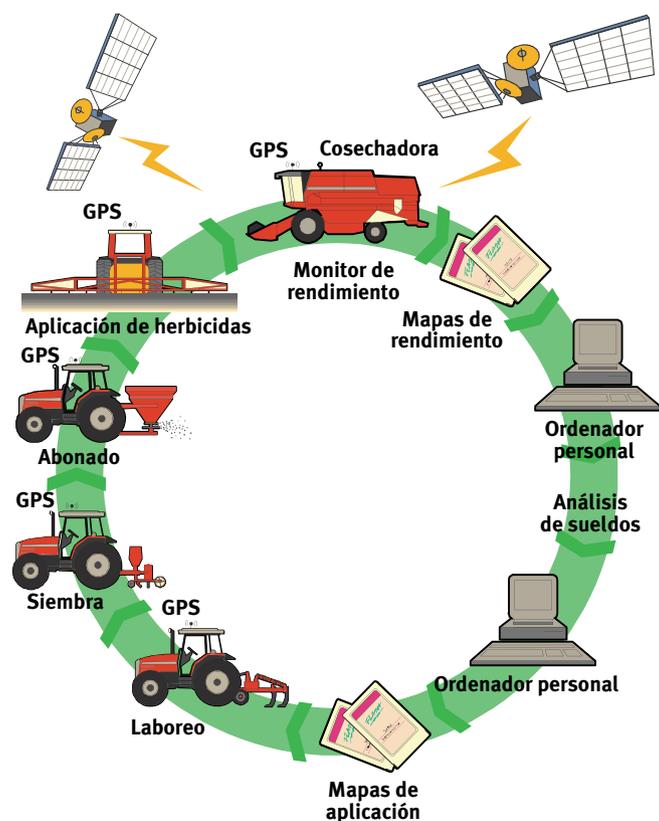
Siguiendo este esquema de etapas, pueden establecerse dos tipos fundamentales de implementación de la AP. La primera de ellas se puede catalogar como de un sistema cíclico o cerrado, en el que las diferentes fases tienen lugar en distintos periodos de tiempo, mientras que la segunda implementación se puede clasificar como de un sistema secuencial o abierta, en la que las fases coinciden prácticamente en el tiempo. El primero de los sistemas se fundamenta en la utilización de cartografías de predicción acumuladas (lo que se conoce como “AP por modulación basada en la utilización de cartografías de predicción”), mientras que el segundo se puede definir como una aplicación diferencial modular en tiempo real (“AP por modulación en tiempo real”).

Respecto a la AP por modulación basada en la utilización de cartografías de predicción, probablemente se trate del sistema de AP más conocido y fue el que primero se desarrolló. Basado en el conocido ciclo cerrado de la AP (Figura 1), esta metodología se apoya en dos principios fundamentales: conocimiento exacto de la posición del móvil en la parcela en un instante determinado y toma de decisiones a partir del análisis de una cantidad más o menos importante de información obtenida a lo largo de los años.

Según se observa en la Figura 1, la aplicación de la AP se trata de una actividad cíclica de retroalimentación, en donde la información acumulada en años precedentes acerca de la variabilidad del medio (rendimiento de los cultivos, contenido de nutrientes en el suelo, disponibilidades de agua o topografía) sirve de

base para el establecimiento de modelos de actuación diferencial en la parcela, ligados básicamente con la aplicación de insumos (fertilizantes, semillas y fitosanitarios). Esta aplicación modular genera a su vez nuevos resultados que pasan a incrementar el volumen de información disponible.

**Figura 1. Ciclo cerrado básico de la agricultura de precisión por modulación basada en la utilización de cartografías de predicción**



En cuanto a la AP por modulación en tiempo real, probablemente sea esta forma de actuación la que más parecido presenta con la agricultura tradicional y la manera de hacer de los agricultores, quienes reciben información que les permite detectar las variabilidades intraparcarias, para, de forma inmediata, entrar en funcionamiento los dispositivos de actuación que posibilitan la modificación en continuo de las condiciones de regulación de los implementos y las aplicaciones agrícolas. Aparentemente esta segunda vía de aplicación de la AP resulta más sencilla y menos dependiente de agentes externos, por lo que un análisis de la misma pone de manifiesto algunas ventajas a tener en cuenta:

- Independencia de los sistemas de posicionamiento, ya que al establecerse de forma inmediata el mecanismo de detección-respuesta, no precisa de la determinación de la posición del móvil en la parcela.
- La actuación diferencial se realiza en tiempo real y en base a información específica del momento, por lo que no es necesario el acopio y manejo de información de campañas anteriores. No se precisa, por tanto, del apoyo de sistemas SIG.
- No es imprescindible, aunque si aconsejable, la transmisión de información entre las diferentes operaciones a realizar en una misma parcela.

Sin embargo, el retraso en el desarrollo e implementación de esta alternativa está directamente ligado con algunos de los inconvenientes que presenta:

- Dependencia total y absoluta del tipo y calidad de captador utilizado, ya que la única fuente de información proviene de la lectura directa de sensores, por lo que un error en la medida lleva a actuaciones contrarias a las necesarias. El problema actual reside en la dificultad de desarrollar este tipo de captadores.
- Necesidad de contar con sistemas de interpretación y traducción de la información de forma eficaz y rápida. Por ejemplo, es evidente que existe una relación agronómica entre el nivel de clorofila de una planta y sus necesidades de nitrógeno. Pero cuando este nivel de clorofila se determina de forma indirecta a partir del grado de reflexión de la luz, es imprescindible el desarrollo de programas de traducción de estos datos a unidades de fertilizantes necesarias, y que esta traducción sea correcta.
- Rapidez de respuesta, puesto que si la aplicación modular se realiza en tiempo real es preciso que la información obtenida por el sensor se interprete de forma rápida y eficaz, y que esta interpretación se transmita de la misma forma al elemento final actuador (apertura de la tolva de la abonadora, disco de la sembradora, boquilla del pulverizador o similar). Cualquier retraso en la respuesta se traduce en una aplicación diferencial desfasada en el tiempo y, en consecuencia, en el espacio.

La puesta en práctica de cualquiera de estas dos variantes de AP implica la utilización de herramientas y tecnologías, independientes entre sí pero completamente ligadas para la consecución del objetivo final. Pueden establecerse cinco niveles de tecnologías a utilizar, los cuales son enunciados a continuación:

- 1 Elementos o sistemas que permiten la determinación exacta de la posición de los equipos agrícolas durante el trabajo. Se trata de los sistemas de posicionamiento global (GPS), el GPS con corrección diferencial (DGPS) y el RTK. El sistema de posicionamiento global GPS (*Global Positioning System*) está basado en obtener la información de la situación de un móvil a partir de la determinación de la distancia entre su posición y al menos tres satélites (triangulación) de órbita conocida. De todo ello se hablará detalladamente en secciones posteriores.
- 2 Dispositivos captadores capaces de detectar y almacenar la información referente a la variabilidad intraparcilaria.

Entre la gran variedad de sensores empleados en AP destacan los de rendimiento (los cuales, asociados a un sistema GPS, permiten la realización de cartografías de rendimiento, utilizables para posteriores actuaciones) y otros captadores de adquisición de información del suelo, plantas cultivadas, malas hierbas, enfermedades y clima. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de mapa de conductividad eléctrica aparente en una finca de viñedo, dividida en parcelas con diferentes variedades, en donde la información de la conductividad eléctrica aparente puede ser correlacionada con la de características o estado nutricional del suelo, mientras que en la Figura 4 se refleja la implementación actual de un sistema de monitorización de rendimiento en una cosechadora de cereales. En la Tabla 1 se incluyen los diferentes tipos de captadores existentes empleados en las aplicaciones de AP.



Figura 2. Aplicación de un sistema RTK-GPS durante ensayos para el control de aperos (cortesía de InlandGeo - Topcon)

Por otro lado, la variabilidad intraparcilaria también comprende informaciones como el contenido en materia orgánica, la composición química y las características físicas del suelo, obtenidas a partir de captadores, análisis de suelos, imágenes tomadas desde plataformas terrestres (tractores o robots), aéreas (globos, helicópteros o aviones) e incluso imágenes de satélites (teledetección). En el caso de la realización de análisis de suelos, el mayor problema reside en establecer un sistema práctico y abordable de toma de muestras, con su correspondiente georreferenciación (Figura 5).

Figura 3. Mapa de conductividad eléctrica aparente en una finca de viñedo, dividida en parcelas con diferentes variedades

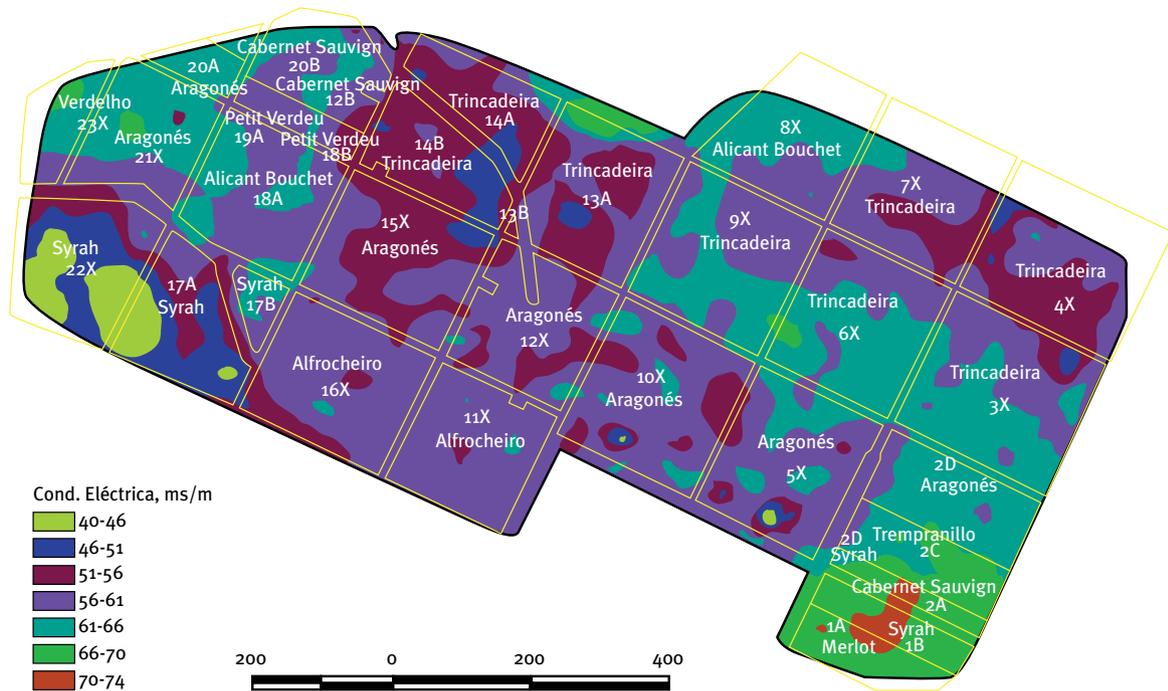
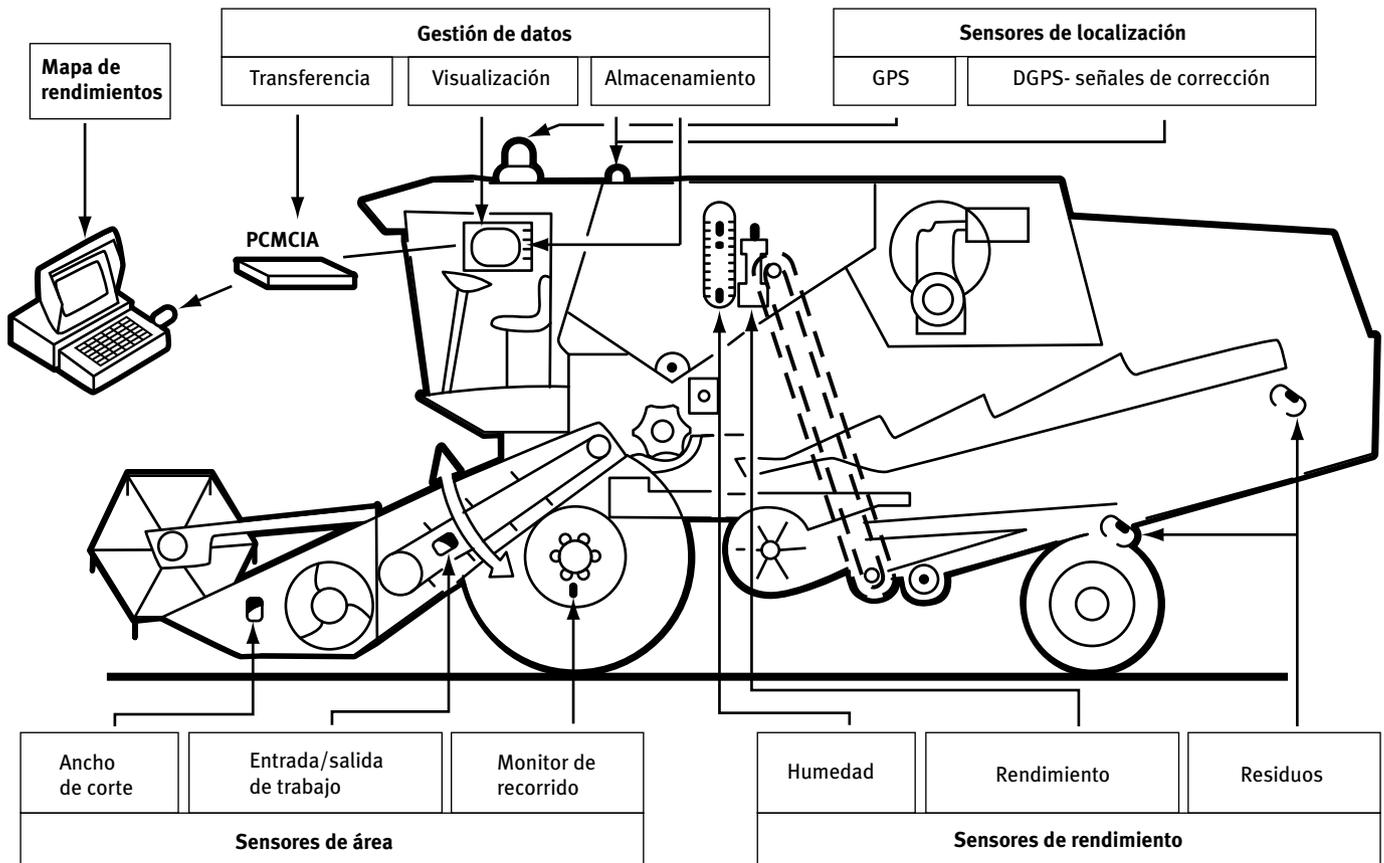


Figura 4. Implementación actual de un sistema de monitorización de rendimiento en una cosechadora de cereales



**Tabla 1. Tipos principales de captadores utilizados en agricultura de precisión.** (Fuente: Gil, 2001)

Tipo de captador	Principio de funcionamiento	Información suministrada
<i>Información sobre la planta</i>		
Rendimiento en grano	Medida del flujo o volumen de grano	Con sistemas GPS permiten la elaboración de mapas de rendimiento
Rendimiento de remolacha y patata	Medida dinámica del peso	Con sistemas GPS permiten la elaboración de mapas de rendimiento
Contenido de clorofila del cultivo	Medida del contenido de clorofila a partir de la reflexión de la luz	El captador utiliza la reflexión de la luz por el cultivo para la medida de las necesidades de nitrógeno a partir de un software determinado
<i>Información sobre el suelo</i>		
Parámetros físicos	Medida de la conductividad eléctrica del suelo	Con sistemas GPS permiten obtener mapas de zonas diferenciales para la posterior toma de muestras de otros parámetros
Contenido en materia orgánica	Medida de la reflectometría por infrarrojos	Captador que permite medir en tiempo real la tasa de materia orgánica en la superficie del suelo para el establecimiento de una aplicación modular de fertilizantes
Parámetros químicos	Electrodos rápidos deslizantes	Capaz de determinar en los primeros cm de suelo, y en tiempo real, el contenido en materia orgánica, la humedad y el contenido en nitratos
<i>Información sobre malas hierbas</i>		
Detección de la presencia de vegetación	Medida de la reflectometría por infrarrojos	Permite la detección en tiempo real de la presencia de vegetación adventicia en un suelo desnudo
<i>Información global sobre el medio</i>		
Fotos aéreas o imágenes de satélites	Medida de la reflexión de la luz natural en diferentes longitudes de ondas	Establecimiento de zonas heterogéneas en el interior de la parcela debidas, entre otras causas, al estado del suelo y del cultivo



Figura 5. Equipo automático de toma de muestras georreferenciadas de suelo para su posterior análisis en laboratorio

3 Herramientas de gestión georreferenciada de la información parcelaria. Son los sistemas de información geográfica (SIG), paquetes informáticos que permiten tratar la información de diversas fuentes en su conjunto y establecer de forma ordenada la gestión relativa a un punto determinado.

4 Modelos de ayuda para la toma de decisiones. Para cada una de las operaciones culturales, existen diferentes modelos de ayuda basados en las características agronómicas de los cultivos y en los datos obtenidos con los captadores. Se obtienen así aplicaciones informáticas capaces de simular, en función de las particularidades del medio, el desa-

rollo del cultivo, las necesidades de fertilizantes, el rendimiento potencial de la cosecha o el riesgo de afectación ante determinadas plagas o enfermedades.

5 Tecnologías capaces de controlar automáticamente los equipos agrícolas (mecatrónica), de forma que se pueda modificar en continuo y en tiempo real las condiciones de regulación de los mismos. En este ámbito se encuentran los equipos de laboreo del suelo, los cuales modifican en continuo aspectos como la velocidad de giro de los elementos accionados por la toma de fuerza, la profundidad de trabajo o la alineación de las pasadas, en función de la variabilidad del interior de la parcela, detectada mediante la utilización de sensores, tratamiento de imágenes o a partir de cartografía sobre nivel de compactación, profundidad del suelo o tipo de textura, elaborada con información recopilada en campañas precedentes. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de aplicación de sistemas de modulación en continuo en una labor de preparación del suelo.

Es necesario destacar en este punto los grandes avances conseguidos y la amplia utilización que ya existe hoy en día de las técnicas de modulación en continuo en la aplicación de semillas, fertilizantes y fitosanitarios (dosificación variable). Así, a modo de ejemplo, para las aplicaciones de fertilización variable existen abonadoras equipadas con diferentes sistemas de control (volumétricos o másicos), que permiten la conexión directa al sistema GPS para la distribución de abono de acuerdo con un mapa de fertilización preestablecido, modificando el grado de apertura del orificio dosificador de la tolva de la abonadora para ajustarlo a las variaciones de la velocidad y dosis reflejadas en el referido mapa.

Por último, se puede indicar que el futuro de la agricultura, y por ello de la AP, necesita de una actuación multidisciplinar que involucre sectores científicos como el agrónomo, informático, mecánico, electrónico y el de las telecomunicaciones. Es preciso la elaboración de actividades de investigación y desarrollo conjuntas capaces de poner a disposición del agricultor las enormes posibilidades de este nuevo sistema de producción.

## 1.2 Implicaciones socioeconómicas y medioambientales de la agricultura de precisión

Las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación (TICs) también se están instalando en el sector agrario en un proceso de incorporación que está siendo lento, tal como suele ocurrir en todos los ámbitos de mejora en este sector. No obstante, es un hecho que en los últimos dos siglos se ha producido una gran evolución de la agricultura y de la ganadería, debido en buena parte al mayor nivel de conocimientos adquiridos sobre los factores de producción en los años finales del siglo XIX y en los del principio del XX, habiéndose propiciado la aplicación de las nuevas tecnologías y con ello el desarrollo de la llamada agricultura de precisión que va abriéndose camino en las explotaciones agrarias de forma muy variada, tanto en la distribución geográfica como en el asentamiento de cada sistema.

Contando con esa lentitud propia del sector, sin embargo, en la actualidad existen numerosas técnicas de agricultura de precisión disponibles para su aplicación práctica y su uso por parte del agricultor o en proceso de investigación o de generación de proyectos piloto. Algunas ya han sido aceptadas por el sector, mientras que otras son simplemente conocidas por los profesionales del sector, o incluso ignoradas absolutamente. En qué forma estas últimas se van a instalar a corto o medio plazo entre los agricultores ya es otra cosa.

Se han generalizado considerablemente los sistemas de guiado; existen aplicaciones completamente desarrolladas y utilizadas en otros países para la generación de mapas de productividad y su continuación en la llamada propiamente “agricultura de precisión”, pero aún solo son adquiridas y utilizadas de forma casi experimental. La agricultura de precisión es mucho más, es un conjunto mucho más amplio de técnicas, sistemas y soluciones que, para generalizarse, tiene que calar en la mentalidad de los agricultores y que acabarán calando, lentamente, claro, cuando lo haga así mismo el sentido empresarial en la explotación agropecuaria, la necesidad de la reducción de costes y un mayor sentido de la respetuosidad medioambiental. Esta introducción no solo depende de la receptividad del empresario agrario, también se ve

dificultada por los costes de esta tecnología aplicadas a la maquinaria y que son elevado en los inicios de su presencia en el mercado, haciéndose solo posible económicamente en grandes explotaciones o cooperativas.



Figura 6. Aplicación de tecnologías de agricultura de precisión de modulación en continuo en una labor de preparación del suelo

Las nuevas tecnologías generan por principio en el sector un rechazo manifiesto, algo que no ocurre en otros sectores. Y ello podría ser debido fundamentalmente a la elevada edad de la población agraria y al nivel de estudios predominante entre sus miembros. Un 30% aproximadamente (datos de 2008, INE) de la población activa agraria ocupada tiene más de 50 años, mientras la media nacional del conjunto de los sectores se sitúa 10 puntos porcentuales por debajo. Y además, la sustitución de los mayores con personas jóvenes no está muy clara, puesto que las cifras que representan los segmentos de edad de 16 a 19 y de 20 a 29 años presentan en los últimos años una suave tendencia al descenso, lo que podría significar una reducción en la renovación del sector con jóvenes.

Por lo que se refiere al nivel formativo de la población activa agraria en el año 2000 (datos INE), solo el 13,2% de la población ocupada en agricultura y pesca tenía un nivel de estudios secundarios no obligatorios y superiores (en este último caso solo el 2,6%), mientras el nivel medio en España en el conjunto de los sectores se situaba en un 46,1%. Por el contrario, es estimulante constatar una ligera tendencia a la mejora del porcentaje de la población agraria ocupada en los últimos años en el segmento de edad comprendida entre los 16 y los 50 años. Para completar el panorama el dato extraído del Censo Agrario de 1999 indica que los jefes de explotación agraria en un 90,8% solo tenían experiencia exclusivamente práctica, sin ningún tipo de formación agrícola. Aunque la situación habrá variado en más o menos medida hasta la fecha, todos estos datos pueden justi-

ficar la lentitud del proceso de adopción de las técnicas de agricultura de precisión, constatado además por el rechazo manifestado a menudo por los agricultores mayores. Pero es una opinión generalizada que ninguna de estas posturas van a impedir el proceso inexorable de la introducción de estas nuevas tecnologías.

Es difícil romper la tradición y la dinámica seguida año tras año por nuestros agricultores, y nos referimos al gran grueso del colectivo, puesto que convive con él un importante grupo constituido por aquellos agricultores que analizan económicamente todo lo que hacen en su explotación, que conocen sus máquinas, que toman sus decisiones de compra con lápiz, calculadora y/o ordenador en mano y que ejercen un efecto imagen de gran importancia para la evolución del sector. Muchos de aquellos aún no han leído el catálogo de sus equipos mecánicos. Algunos, hace no más de 15 años, dispusieron su abonadora en la posición del dosificador adecuada para la aplicación de una dosis determinada y en esa posición la han mantenido. Las boquillas de un pulverizador o atomizador han durado tanto como el propio pulverizador. Pero estas prácticas que se citan como ejemplo de otras muchas que se han realizado tradicionalmente, son asimismo demostración de la dificultad manifiesta de la entrada de las nuevas tecnologías en el seno de ese gran grupo de agricultores citados.

Como contraposición a estos datos más bien negativos, las Escuelas de Capacitación Agraria, en sus distintas acepciones autonómicas, la formación reglada o no reglada, forman continuamente a jóvenes herederos de explotaciones agrarias y a nuevos y a actuales agricultores que adquieren otros conocimientos y otra posición crítica ante las nuevas tecnologías. Las escuelas universitarias de agricultura también hacen su trabajo con la incorporación de materias relacionadas y cursos especializados. Todo lo cual ayudará a la introducción de estas nuevas tecnologías.

También es positivo considerar que la agricultura de precisión es un concepto muy amplio que incluye muchas técnicas y uso de mecanismos, dispositivos y sistemas que ya son comunes en muchas explotaciones: dosificadores proporcionales al régimen de giro del motor del tractor, dosificadores proporcionales a la ve-

locidad de avance, corrección automática de la altura de las barras de los pulverizadores por ultrasonidos, gestión automática de cabeceros, dosificación variable de producto fitosanitario, control de pulverización por tramos, los muy extendidos ya sistemas de guiado y una larga relación que anima a pensar que el primer paso está dado y que vendrán otros a continuación.



Figura 7. Tractor dotado con un sistema de posicionamiento GPS y equipado con una abonadora con control del caudal de fertilizante, preparado para la aplicación de mapas de fertilización

Y como común denominador para garantizar su progresiva introducción están y estarán las ventajas y mejoras que la agricultura de precisión en su sentido más amplio aportan y aportarán a la agricultura y que, además de las que son el objeto de la presente publicación, el ahorro y la eficiencia energética, pueden ser resumidas en esta frase: las técnicas de agricultura de precisión mejoran la productividad al permitir una mejora en el aprovechamiento del tiempo y una reducción de los costes de fertilizantes, semillas, fitosanitarios y combustible, a la vez que se mejora con ellas la ergonomía en el trabajo de los agricultores. Algunas de las ventajas que conlleva esta afirmación se comentan a continuación:

- Mejora del manejo de la información agraria y de la logística de las operaciones que puede propiciar la generación de mapas de cosecha o la implantación de sistemas de control de flotas. Posibilitar un mejor seguimiento de la evolución de cada parcela en el tiempo, tras el seguimiento de la productividad en cada punto de la misma y tras el efecto generado por las

recomendaciones de abonado sugeridas por la metodología. Todo ello facilita el seguimiento del proceso y la trazabilidad de los productos agrícolas de obligado cumplimiento en las explotaciones agrícolas.

- Mejora de la efectividad en la realización de labores; es decir, conseguir labores bien hechas con la ayuda de sistemas de guiado o de equipos de arado manejados por sistemas GPS o de tratamiento de imagen.
- Mejora de la ergonomía del usuario al realizar las labores con mayor comodidad y reducción del cansancio y, como consecuencia de ello, mejora en jornadas de trabajo más largas y con una mayor capacidad real de trabajo y con trabajos mejor hechos.
- Posibilidad de realizar las operaciones en condiciones especiales como son los casos de presencia de niebla, con polvo o por la noche, evitándose por ejemplo el uso de los imprecisos marcadores de espuma utilizados en la aplicación de fitosanitarios, especialmente en condiciones de viento, niebla y presencia de polvo.
- Aplicación exacta de productos fitosanitarios, evitándose solapes excesivos o zonas sin tratar así como una mayor uniformidad en la distribución, como es el caso de las abonadoras de proyección.
- Mejora del conocimiento de los parámetros de funcionamiento de tractores, máquinas y aperos, para mejora de las capacidades de trabajo y de las labores de mantenimiento mecánico.

Si estas razones no son suficientes para convencer a los agricultores añadamos las ventajas medioambientales. Fundamentalmente las que propicia el sistema de generación de mapas de productividad espacial y de aplicación de materias primas agrícolas, pero otros sistemas van a aportar igualmente ventajas importantes.

Con la generación de mapas de productividad espacial el objetivo es conocer la capacidad productiva de cada punto de la parcela. Por lógica, cada uno de esos puntos precisará distintas dosis de materia prima (semilla y fertilizante, principalmente). Si nos fijamos en el fertilizante, y en que con este sistema se va a poder aplicar exactamente en cada punto lo que la planta vaya a asimilar,

estaremos evitando un exceso que, por lavado, pueda ir a parar a las capas freáticas del subsuelo. Lo mismo ocurrirá si se hace una aplicación de fitosanitario por tramos, reduciéndola solamente a aquellos rodales cuya distribución geográfica conocemos previamente. O si se aplica la dosis correspondiente a la vegetación capaz de retenerla. O si se reduce o elimina la deriva al realizar una aplicación en cultivos bajos con boquillas adecuadas, o empleando túneles de reciclado del aire en atomizadores en árboles frutales o plantaciones de viñedo.

### 1.3 Técnicas empleadas en la agricultura de precisión

En este apartado se van a exponer algunas tecnologías usadas comúnmente en AP. Sin embargo, en apartados posteriores se comentarán otras técnicas específicas de cada aplicación práctica.

#### 1.3.1 Sistemas de posicionamiento geográfico (GPS)

##### 1.3.1.1 Las redes de navegación por satélite (GNSS)

Las siglas GPS (*Global Positioning System*) son sinónimo hoy en día del primer sistema de posicionamiento y navegación mediante satélites (GNSS) puesto en marcha en 1970 por el ministerio de defensa de los EEUU, llamado realmente NAVSTAR (*NAVigation System Time and Ranging*) (Parkinson and Spilker, 1996). Originalmente se constituyó por una constelación de 24 satélites que giran alrededor de la tierra controlados por estaciones terrestres (Figura 8). Equipos móviles denominados receptores GPS son capaces de posicionarse sobre la superficie terrestre gracias a las señales que reciben de estos satélites mediante triangulación. Aunque se diseñó con fines militares, hoy en día es usado en gran cantidad de aplicaciones civiles, una de ellas la agricultura (Buick, 2006). Hay en marcha programas de actualización del sistema NAVSTAR, que consisten en lanzar nuevos satélites (32 en la actualidad, para reponer o no los antiguos), aumentar las frecuencias y mejorar la calidad de las señales emitidas.



Figura 8. Izquierda: Constelación de los 24 satélites que giran alrededor de la tierra (Fuente: [www.garmin.com](http://www.garmin.com)). Derecha: Receptor GPS de mano con pantalla LCD para la presentación de datos (Fuente: [www.holux.com](http://www.holux.com))

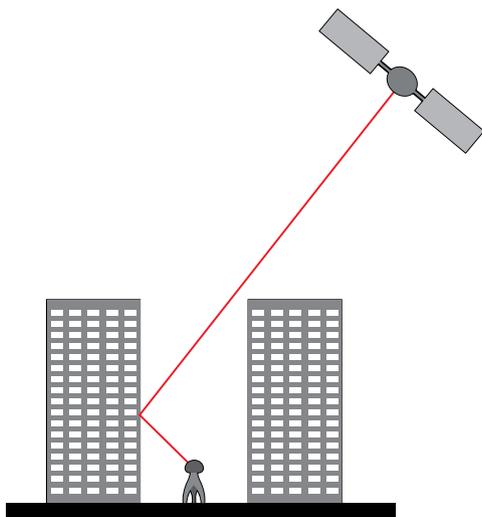
Para proporcionar una posición, un receptor GPS necesita procesar señales de al menos 4 satélites. Las señales son recibidas por medio de una antena, amplificadas y posteriormente procesadas para calcular la distancia del receptor a los satélites. Los receptores tienen información de los satélites ya que ésta se transmite en la señal que reciben, y por triangulación calculan la posición del receptor.



Figura 9. Receptores GPS de cable con diferentes niveles de calidad. A: Receptor Haicom 204III que posiciona con errores RMS de 10 metros. B: Equipo receptor GPS de Novatel con recisiones submétricas. C: Estación base RTK GPS que ofrece correcciones de precisión centimétrica. D: receptor RTK capaz de conectarse a redes GNSS (RTK) mediante enlaces de radio, GPRS y el estándar RTCM

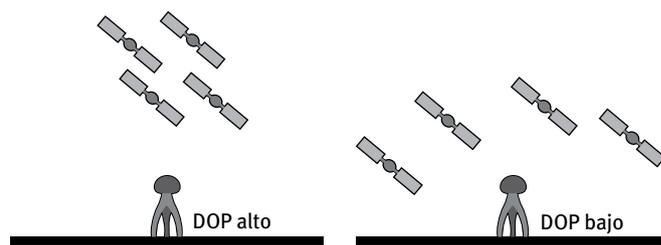
En la precisión de los receptores GPS intervienen diferentes fuentes de error. Algunos de los errores se eliminan o mitigan mediante correcciones diferenciales, pero otros no. Dentro de los primeros se encuentran los errores causados al pasar la señal de los satélites por la ionosfera, los producidos por la no exactitud de los relojes del receptor y de los satélites y los errores en las efemérides o trayectorias que debe seguir el satélite. Por otra parte, los errores debidos al diseño de la antena o a las trayectorias múltiples que sigue la señal hasta llegar al receptor, que se denominan errores debidos al multipath (Figura 10), no se pueden corregir.

**Figura 10. Los errores de tipo multipath son debidos a que el receptor GPS recibe señales de los satélites no directas, sino rebotadas**



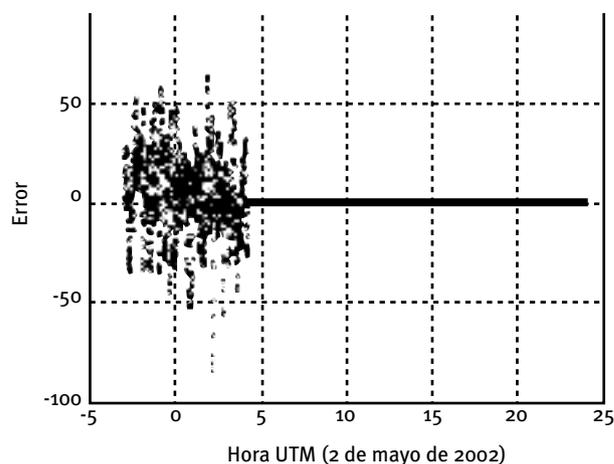
El periodo orbital de los satélites GPS es de aproximadamente 12 horas. Los satélites que se visualizan desde un punto de la tierra están en movimiento, y dependiendo del momento estarán en unas u otras posiciones. Cuando esta geometría no es la correcta con respecto a la posición del receptor para triangular, la precisión del posicionamiento disminuye. El DOP (*Dilution Of Precision*) es un parámetro que informa de la disminución de la precisión en el posicionamiento en función de la geometría de los satélites y es proporcionado por el propio receptor GPS. Cuando este parámetro es bajo, la precisión es mayor (Figura 11).

**Figura 11. Cuando la geometría de los satélites produce una buena triangulación, el DOP es más pequeño y la precisión mayor**



La disponibilidad selectiva (*Selective Availability*) es una fuente de error que el Departamento de Defensa de los Estados Unidos introdujo intencionadamente con el fin de que los receptores civiles tuviesen menos precisión. Este mismo departamento eliminó en mayo de 2000 estos errores, y desde entonces los receptores GPS civiles son mucho más precisos (Figura 12).

**Figura 12. Magnitudes del error obtenidas sobre un receptor fijo el día 2 de mayo de 2000, en el que se aprecia la eliminación de la disponibilidad selectiva.** (Fuente: Zumberge and Gendt, 2001)



Además del sistema GPS americano (NAVSTAR), la antigua URSS puso en marcha su propio sistema (GLO-NASS) del que hoy funcionan una veintena de satélites, y hay previsto un programa de renovación. Hay receptores GPS capaces de recibir señales de ambos sistemas, con lo que puede aumentar su precisión.

La Agencia Espacial Europea (ESA) está poniendo en marcha su propio sistema de posicionamiento por satélite denominado GALILEO, de carácter plenamente civil. Esta agencia ya proporciona en toda Europa correcciones diferenciales satelitales EGNOS (*European*

*Geostationary Navigation Overlay Service*) recibidas por muchos receptores GPS y que trabajarán sobre los futuros receptores GALILEO.

### 1.3.1.2 Tipos de receptores GPS y su precisión

Los receptores GPS ofrecen diferentes niveles de precisión. La precisión alcanzada con el sistema GPS básico es del orden de 5 a 10 m, lo cual le hace útil sólo en tareas de navegación para la elaboración de mapas de rendimiento o fertilización. Por otro lado, en la mayoría de los casos, la determinación de la posición sólo precisa del conocimiento de dos coordenadas (longitud y latitud). No obstante, en algunas ocasiones es necesario conocer una tercera coordenada, elevación, en lo que se conoce como agricultura de precisión 3D.

Sin embargo, para poder obtener una precisión compatible con la mayoría de las operaciones agrícolas es necesario disponer, además de la señal GPS, de una señal de corrección. Se habla entonces de GPS diferencial o DGPS (*Differential Global Positioning System*), con el que se consiguen precisiones inferiores a 1 m, habitualmente entre 30 y 50 cm, en función del equipamiento utilizado y del tipo de señal de corrección, siendo las más frecuentes la emitida por la banda FM o a partir de un satélite específico. Correcciones diferenciales de pago proporcionadas por empresas (*Omnistar, Starfire, etc.*) reducen el error.

Existe otra alternativa que incrementa notablemente la precisión en la determinación de la posición. Se trata del RTK (*Real Time Kinematic*) o GPS cinemático. Para la realización de determinadas labores en campo, como el trabajo entre líneas de cultivos, la siembra, el control de solapamientos y la conducción de maquinaria, la resolución alcanzada por el DGPS tampoco es suficiente. Se necesita en estos casos precisiones a nivel de centímetros (entre 1 y 5 cm), y no únicamente en relación con la posición horizontal, sino en las tres dimensiones. El GPS cinemático determina la posición exacta del móvil midiendo el desfase entre la transmisión y la recepción de una señal. Sin embargo, la utilización de esta modalidad no está demasiado extendida en agricultura debido, entre otros motivos, a los riesgos de pérdida de señal en determinados momen-

tos. Además, para el correcto funcionamiento del sistema es necesaria la actuación de como mínimo cinco satélites, lo que en determinados momentos o situaciones no está actualmente garantizada. Sin embargo, las características y ventajas potenciales que ofrece el RTK-GPS inducen a prever una generalización en su uso en un futuro próximo. En la Figura 2 se muestra la aplicación de un sistema RTK-GPS durante ensayos para el control de aperos.

En ciertas aplicaciones como las agrícolas no se necesitan posiciones absolutas sino relativas a pasadas anteriores, y en este caso la precisión en este posicionamiento relativo es mucho mayor si las medidas se hacen en instantes de tiempo cercanos. De esta forma, para tiempos menores a cinco minutos, un receptor GPS económico con posicionamiento absoluto puede dar errores inferiores al metro. Al aumentar el intervalo de tiempo entre el que se hacen las medidas, el error relativo aumenta.

### 1.3.2 Avances en las tecnologías GPS

Hasta hace poco, el empleo de equipos de posicionamiento RTK obligaba a usar un complejo conjunto de dispositivos: la estación base, el receptor móvil (o varios de ellos), baterías para ambos, los enlaces de radio, un trípode, la pértiga para llevar el transmisor... En la Tabla 2 se resumen las ventajas e inconvenientes de un sistema RTK tradicional de este tipo.

Hoy disponemos de nuevos sistemas que integran varios de estos equipos en un único dispositivo, que además pueden recibir automáticamente señal de los satélites de cualquier constelación GNSS (el tradicional GPS, el ruso GLONASS o el europeo Galileo, cuando esté operativo) y todo ello con una autonomía y tamaño adecuados para ir montados en un pequeño mástil cómodamente. Sin embargo, para conseguir la alta precisión que la tecnología RTK ofrece, se hacía necesario hasta ahora disponer de una estación base propia y localizarla en un punto central de la explotación para dar servicio a toda el área de interés. Pero todo esto está cambiando, y muy rápido.

**Tabla 2. Ventajas e inconvenientes del RTK tradicional (con una sola estación base).** (Fuente: Leica)

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El modo de funcionamiento es bien conocido y normalmente fácil de implementar</li> <li>• La trazabilidad según cambia la posición puede ser mantenida gracias a que la estación base está fija, y los cálculos los realiza el receptor móvil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La estación base es costosa</li> <li>• Posicionar y arrancar la estación base puede ser complicado y requerir cierto tiempo</li> <li>• Según aumenta la distancia entre la estación de referencia y el receptor móvil, disminuye la precisión en el cálculo de la posición</li> </ul>

### 1.3.2.1 Los “clusters” o agrupaciones de RTK

Para cubrir áreas grandes se hacía necesario mover la estación base de un sitio a otro, con el consiguiente gasto de tiempo y de dinero. En algunos sectores, como el de obras e infraestructuras civiles, este problema puede ser crítico, por lo que se llegó pronto a una solución intermedia: repartir por el territorio un pequeño número de estaciones base “semi-fijas”. Este conjunto (o “cluster”) de estaciones RTK dan servicio a un área mayor, de forma que el receptor móvil (por ejemplo, tractor) recibe la señal de corrección de su posición desde la base que se encuentra más próxima en cada momento.

Como es lógico, esta solución, que normalmente ha de costear el propio usuario, no es económicamente rentable en el caso de las tareas agrícolas de un único agricultor, ya que el coste de varias estaciones base puede ser muy alto. Sin embargo, no son pocas las asociaciones de productores a nivel mundial que han instalado sus “clusters de RTK” para cubrir su zona productiva, y dar servicio a sus socios. No es una mala solución, pero presenta varias desventajas:

- El receptor (tractor) recibe corrección de una sola estación base.
- Si se mueve fuera del alcance de esa base, el usuario ha de cambiar manualmente el equipo receptor para “escuchar” la señal de otra base.

- No se corrige el error proporcional a la distancia hasta la estación base (de lo cual se habla más adelante).
- Por lo anterior, la precisión que se consigue con un “cluster de RTK” no es mayor que la de un RTK tradicional en solitario.
- Las estaciones base han de ser costeadas por el usuario (o asociación de productores).

Según los expertos, los “clusters RTK” tenderán a desaparecer o a convertirse en verdaderas “redes RTK”, ya que todo son ventajas en este sentido.

### 1.3.2.2 Las redes RTK

Recientemente se están implantando por muchas áreas del mundo las llamadas “redes RTK” o “redes GNSS” que permitirán disponer de alta precisión sin necesidad de estación base. En la Tabla 3 se indican las ventajas que esta tecnología aporta.

Una “red RTK” es un conjunto de receptores GPS (o GNSS) permanentes, repartidos por un área extensa, cuya señal combinada se emplea para generar las correcciones diferenciales RTK que cualquier receptor cliente GPS pueda necesitar durante su trabajo. Hoy en día existen redes RTK operativas en muchos países (Reino Unido, Irlanda, Alemania, España, Hong Kong, partes de América y de Australia, entre otros). En Europa es destacable la implantación de la red “SmartNet EUROPE”, con tecnología de la empresa *Leica Geosystems*. Las redes RTK pueden variar en tamaño, desde pequeñas redes locales con unas pocas estaciones de referencia, hasta docenas de estaciones cubriendo todo un país. El mapa de la Figura 13 muestra las estaciones de la red SmartNet en España. Por su parte, *Trimble* también está instalando estaciones para su red RTK en España, si bien por ahora sólo está disponible en la Comunidad de Madrid. Otra empresa en alza es *Topcon*, que ya dispone de redes en Galicia y otras áreas de España, pero de gestión privada.

Generalmente, los usuarios han de suscribirse a la red RTK para recibir la corrección diferencial, pero también hay ya **redes públicas**, otras en desarrollo, o

parcialmente financiadas con fondos regionales, institucionales, etc. En España la situación es privilegiada puesto que la mayoría son de uso gratuito si no es con fines lucrativos.



Figura 13. Estaciones base de la red SmartNet de Leica en España. (Fuente: Leica Spiderweb)

Hay redes públicas desplegadas en:

- Murcia (REGAM y Meristemum)
- Euskadi
- Navarra (RGAN)
- Comunidad Valenciana (ERVA)
- Madrid (IBEREF)
- Cataluña (CATNET)
- Andalucía (RAP)
- La Rioja
- Castilla y León (Red GNSS del ITACYL)
- Toda Europa (EUREF)

Las correcciones RTK pueden ser generadas por la red RTK mediante varios métodos de control y de cálculo, como las conexiones MAX (Master-Auxiliary), el MAX individualizado (i-MAX), las Estaciones Virtuales de Referencia (VRS) o la parametrización Flächern-Korrektur (FKP).

### 1.3.2.3 Funcionamiento del RTK de una sola estación base

La forma más fácil de hacerse a la idea de lo que una red RTK supone es compararla con el sistema RTK tradicional. Un receptor RTK tradicional (como el que puede estar instalado en un tractor o en una sembradora de precisión) recibe la corrección de una sola estación base de referencia. Ésta puede estar situada en una posición permanente (por ejemplo, el techo de la oficina) o puede situarse temporalmente en el campo cerca de donde se vaya a necesitar cada día.

El principio de funcionamiento siempre es el mismo: se pone a punto la estación base en un punto conocido y se envían correcciones a los receptores móviles (vía radio-módems o enlaces GSM). Hay tres reglas en el intercambio de mensajes entre el receptor móvil y la estación base:

- 1 Tanto el receptor como la estación base están observando el movimiento del mismo conjunto de satélites GPS.
- 2 La estación envía al receptor tanto su posición como toda la información de los satélites.
- 3 El receptor combina toda la información para calcular la posición RTK corregida.

Los últimos desarrollos en los algoritmos de cálculo de la posición mediante RTK permiten al receptor móvil situarse hasta a 50 km de la estación base.

La pérdida de precisión con el aumento de la distancia a la estación de referencia RTK se debe fundamentalmente a los cambios en las condiciones atmosféricas: según aumenta la distancia, la atmósfera entre ambos se hace más y más diferente, y los algoritmos de cálculo no son capaces de resolver las ambigüedades.

En el caso de usar un “cluster RTK” o conjunto de estaciones base, el receptor recibe la señal de corrección sólo de aquella que esté más cerca en cada momento, a diferencia de lo que ocurre en las verdaderas “redes RTK”.

### 1.3.2.4 Funcionamiento de una red RTK

Una red RTK requiere un mínimo de cinco estaciones base (no hay máximo) situadas a unos 70 km de distancia entre sí. Normalmente son estaciones fijas y forman el corazón de la red RTK. El objetivo principal de una red RTK es minimizar la pérdida de precisión debida a la distancia a la estación base.

Todas las estaciones base están conectadas a un servidor central, al que envían continuamente información sobre su posición y satélites a la vista. El servidor ejecuta un software capaz de:

- Resolver las ambigüedades de los satélites, y
- Usar la información de todas las estaciones, o un subconjunto de ellas, para enviar la corrección a cualquier receptor RTK móvil dentro de los límites de la red.

El receptor móvil se conecta a la red RTK mediante un enlace uni o bi-direccional (radio modem, GSM o internet). Al recibir la señal, calcula su posición usando un algoritmo concreto. El algoritmo (y con ello el error relativo a la distancia) depende del tipo de conexión de red RTK (MAX, FKP, VRS, ...). Cada uno de ellos usa un modelo de cálculo diferente, y también pueden llevar a cabo el cálculo en el receptor móvil o en el servidor, dependiendo de su configuración. De este modo, la relación entre el receptor y la red es diferente en cada caso, lo cual provoca grandes diferencias en funcionamiento, precisión, fiabilidad y trazabilidad del usuario móvil.

**Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de las redes RTK.**

(Fuente: Leica)

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"><li>• No es necesario comprar ni instalar una estación base</li><li>• Las precisiones de las posiciones calculadas según va moviéndose el receptor móvil son más homogéneas</li><li>• La precisión se mantiene aunque el receptor se mueva grandes distancias</li><li>• Se puede cubrir el mismo área sin necesidad de instalar múltiples estaciones base propias (o moverlas de un sitio a otro)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• El coste de suscripción a la red RTK (si no está financiada por una entidad pública, en cuyo caso es gratuito)</li><li>• El coste de la transmisión de la corrección (normalmente por internet vía móvil GPRS)</li></ul>

La tecnología GPS está evolucionando rápidamente, y el RTK es buen ejemplo de ello. El control de rodada mediante tráfico restringido a ciertas “calles” de la parcela es un ejemplo de aplicación que requiere precisiones altas, por lo que las recientes redes RTK (o GNSS) públicas o privadas proporcionan un medio excelente para proveer de corrección diferencial de alta calidad a un bajo coste.

### 1.3.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG), también denominado *Geographics Information System* (GIS), es un conjunto de programas y aplicaciones informáticas que permite la gestión de datos organizados en una base de datos, referenciados espacialmente y que pueden ser visualizados mediante mapas.

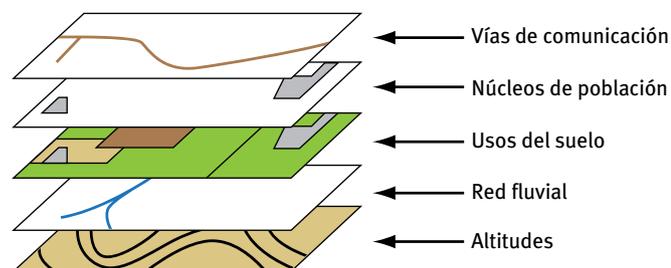
Desde el punto de vista de los datos, un SIG se basa en una serie de capas de información espacial en formato digital que representan diversas variables (Figura 14), o bien capas que representan entidades a los que corresponden varias entradas en una base de datos enlazada.

Estas capas corresponden, al menos en parte, a la misma zona, de manera que pueden analizarse en conjunto.

De este modo puede combinarse, en un mismo sistema, información espacial y temática, con orígenes y formatos muy diversos.

**Figura 14. Superposición de capas de información.**

(Fuente: <http://es.wikipedia.org>)



Desde el punto de vista de las herramientas, los Sistemas de Información Geográfica se han desarrollado a partir de la unión de diversos tipos de aplicaciones informáticas: la cartografía automática tradicional, los sistemas de gestión de bases de datos, las herramientas de análisis digital de imágenes, los sistemas de ayuda a la toma de decisiones y las técnicas de modelización física.

Podríamos considerar, en sentido amplio, que un SIG está constituido por:

- 1 Bases de datos espaciales en las que la realidad se codifica mediante unos modelos de datos específicos.
- 2 Bases de datos temáticas cuya vinculación con la base de datos cartográfica permite asignar a cada punto, línea o área del territorio unos valores temáticos.
- 3 Conjunto de herramientas que permiten manejar estas bases de datos de forma útil para diversos propósitos de investigación, docencia o gestión.
- 4 Conjunto de ordenadores y periféricos de entrada y salida que constituyen el soporte físico del SIG. Estas incluyen tanto el programa de gestión de SIG como otros programas de apoyo.
- 5 Comunidad de usuarios que pueda demandar información espacial.
- 6 Administradores del sistema encargados de resolver los requerimientos de los usuarios, bien utili-

zando las herramientas disponibles o bien produciendo nuevas herramientas.

### 1.3.3.1 Uso de los sistemas SIG

La inclusión de información espacial y temática permite llevar a cabo consultas de diverso tipo, desde las más simples a las más complejas, así como analizar los datos y ejecutar modelos acerca del funcionamiento de los sistemas ambientales representados.

Quizás la operación más sencilla sea la producción de mapas de las variables contenidas en una base de datos o de nuevas variables calculadas a partir de las disponibles. Por ejemplo, si disponemos de un mapa de municipios y una base de datos con la población y el PIB de los distintos países, podemos generar mapas de ambas variables o de la renta per cápita. Esto no supone la obtención de nueva información, es simplemente una operación de cartografía automática.

Un paso adelante sería la obtención de respuestas a una serie de consultas sobre los datos y su distribución en el espacio:

- ¿Qué hay en el punto X?
- ¿Qué características tiene el punto X respecto a otro?
- ¿Qué puntos cumplen determinadas condiciones?
- ¿Qué relación hay entre A y B?
- Distancia entre dos puntos.
- Conexión entre dos puntos.
- Pertenencia a un mismo conjunto.
- Más sofisticado sería el uso de herramientas de análisis espacial y álgebra de mapas para el desarrollo y verificación de hipótesis acerca de la distribución espacial de las variables y objetos.
- ¿Disminuye la temperatura con la altitud?
- Los individuos de una determinada especie, ¿tenden a agruparse o permanecen aislados?
- ¿Cuál es el tamaño mínimo de un área de bosque para mantener una población viable de osos?

Un punto más allá de sofisticación sería la utilización de un SIG para resolver problemas de toma de decisión en planificación física u ordenación territorial, mediante el uso de instrucciones complejas del análisis espacial y álgebra de mapas. En definitiva se trataría de resolver preguntas del tipo:

- ¿Qué actividad es la más adecuada para un área concreta?
- ¿Cuál es el mejor lugar para la instalación de determinada actividad?
- ¿Cuál va a ser el impacto sobre el medio?
- ¿Cuál es la forma y tamaño adecuados de los espacios naturales?

Finalmente, las aplicaciones más elaboradas de los SIG son aquellas relacionadas con la integración de modelos matemáticos de procesos naturales, dinámicos y espacialmente distribuidos. El objetivo puede ser tanto científico como de planificación y ordenación.

- ¿Qué áreas pueden inundarse en caso de producirse un episodio lluvioso dado?
- ¿Qué consecuencias ambientales puede tener un embalse aguas abajo?
- ¿Cómo podría mejorarse la eficiencia en el uso del agua?

En estos casos los programas se utilizan tanto para introducir las capas de información inicial como para ver y analizar los resultados del modelo en su distribución espacial.

### 1.3.3.2 Aplicaciones de los SIG

Un Sistema de Información Geográfica es una herramienta que permite la integración de bases de datos espaciales y la implementación de diversas técnicas de análisis de datos. Por tanto, cualquier actividad relacionada con el espacio puede beneficiarse del trabajo con SIG. Entre las aplicaciones más usuales destacan:

- Científicas:
  - Ciencias medioambientales y relacionadas con el espacio.

- Desarrollo de modelos empíricos.
- Modelización cartográfica.
- Modelos dinámicos - Teledetección.

- Gestión:

- Cartografía automática.
- Información pública, catastro.
- Planificación física.
- Ordenación territorial.
- Planificación urbana.
- Estudios de impacto ambiental.
- Evaluación de recursos.
- Seguimiento de actuaciones.

- Empresarial:

- Marketing.
- Estrategias de distribución.
- Planificación de transportes.
- Localización óptima.
- Agricultura de precisión.

### 1.3.3.3 Aplicaciones de los SIG en el campo de la agricultura

Gracias al sistema de posicionamiento GPS es posible tomar datos fácilmente sobre la variabilidad geográfica de variables en las parcelas como la fertilidad. Para almacenar y procesar los datos de variabilidad los Sistemas de Información Geográfica son esenciales. Un sistema SIG permite mostrar complejas vistas de variables en las parcelas y tomar decisiones para realizar los cultivos. Más concretamente es posible estimar el valor óptimo de los nutrientes a aportar en cada parte del terreno. Esto permite un ahorro económico y previene la contaminación producida por el empleo en exceso de fertilizantes.

### 1.3.4 Fundamentos de teledetección y visión artificial

#### 1.3.4.1 Teledetección

La teledetección y la visión artificial son dos tecnologías íntimamente ligadas, tanto dentro como fuera del campo de la agricultura de precisión. Por una parte, la teledetección engloba a la visión artificial, dado que la interpretación de imágenes es una de las técnicas empleadas dentro de la teledetección. Por otro lado, la visión artificial supone dar un paso más en la interpretación de información remota, ya que emplea técnicas y algoritmos automáticos para el análisis de la escena capturada en una imagen. Sin necesidad de la supervisión o interpretación humana se pueden reconocer los componentes y objetos de una imagen y actuar en consecuencia.

La teledetección o detección remota (del inglés *remote sensing*) consiste en la observación e interpretación de objetos sin que exista contacto físico con ellos. Para cumplir ese objetivo los objetos deben producir perturbaciones en su entorno, siendo esos cambios en el medio los captados por los sensores de teledetección. Los objetos pueden producir perturbaciones sobre radiación electromagnética, ondas acústicas o el campo magnético terrestre. Sin embargo, la teledetección emplea mayoritariamente técnicas de radiación electromagnética, empleando las bandas espectrales desde las ondas de radio de baja frecuencia hasta los rayos X, pasando

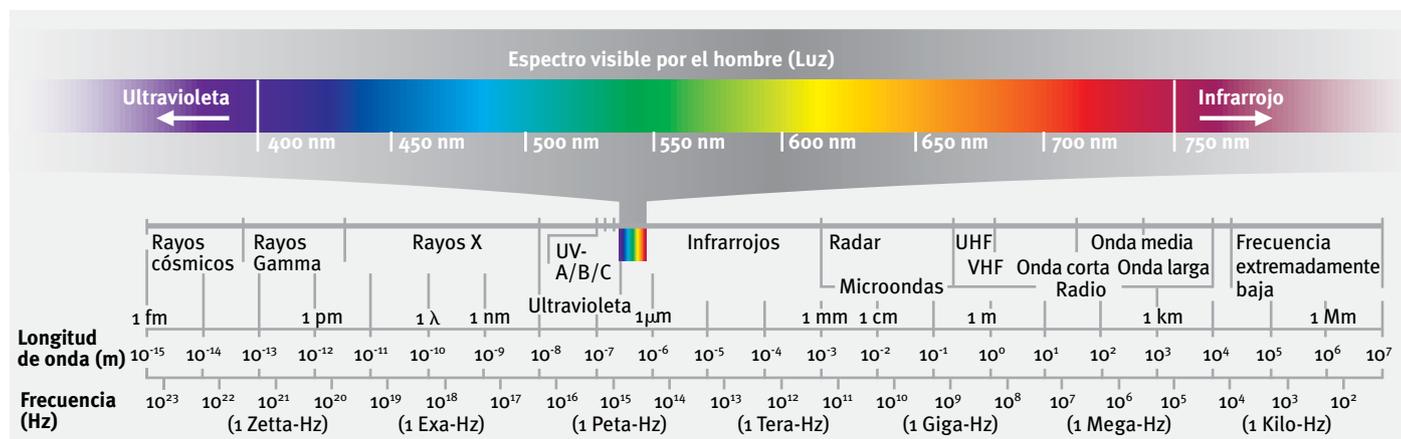
por las bandas del visible y del infrarrojo, muy útiles en la teledetección para agricultura.

Los procesos implicados en un sistema de teledetección son:

- Emisión de radiación electromagnética desde una fuente.
- Interacción de la radiación con los objetos de interés y con otros objetos o medios.
- Recepción de las ondas electromagnéticas por medio de instrumentos a bordo de una plataforma.
- Tratamiento de la información, mediante análisis visual o procesado digital.
- Explotación de la información extraída.

La fuente de emisión de radiación electromagnética puede ser natural (sensores pasivos) o artificial (sensores activos), aunque habitualmente se aprovecha la radiación solar, que emite radiación en diferentes bandas del espectro electromagnético y con distintas intensidades en cada banda (Figura 15). La interacción entre esta radiación y los objetos de interés puede darse en forma de reflexión, refracción, difracción o absorción. Estos procesos, para un mismo objeto, pueden ser diferentes en cada una de las bandas espectrales. Por lo tanto, para cada tipo de detección se emplean los rangos de frecuencias más adecuados, aquellos que producen mayor diferenciación entre los objetivos estudiados y su entorno o entre distintos objetivos de interés.

Figura 15. Bandas del espectro electromagnético



Además de los objetos de interés, otros medios también interfieren en la radiación solar, principalmente la atmósfera y las nubes. Se producen los mismos efectos de reflexión, refracción, difracción y absorción en distintas franjas espectrales. Por ejemplo, en la mesosfera, entre los 30 y los 80 km sobre la superficie terrestre, debido a la presencia de ozono ( $O_3$ ), se absorbe la radiación ultravioleta (UV) casi por completo. Esto, además de proteger a los seres vivos, impide que la radiación UV solar sea útil para sistemas de teledetección. Otros picos de absorción se producen en la atmósfera a causa del vapor de agua ( $H_2O$ ), del oxígeno ( $O_2$ ) y del dióxido de carbono ( $CO_2$ ).

Finalmente, de toda la radiación solar que recibe la Tierra, el 37% es devuelta al espacio por efecto de la reflexión en las nubes (26%) y de la dispersión producida por otras partículas (11%). Otro 16% de la radiación total es absorbida por el vapor de agua de la atmósfera, por lo que sólo el 47% de la radiación solar alcanza la superficie terrestre y lo hace con un perfil espectral modificado, atenuado en ciertas bandas espectrales. El 19% del total llega como radiación directa y el 28% como radiación difusa, debida a la difracción producida por las moléculas que componen la atmósfera. Por lo general, los sensores de teledetección tratan de captar la radiación reflejada por los objetos, por lo que resulta muy importante conocer qué tipo de radiación reciben y qué patrón de reflexión cumple cada uno de los objetivos; es decir, para qué bandas espectrales los objetos estudiados reflejan mayor o menor cantidad de radiación. Por supuesto, la energía no reflejada es la que resulta absorbida, refractada o difractada por los objetos.

El suelo es uno de los objetivos de interés en la teledetección para la agricultura de precisión. Dependiendo de la composición de la capa superficial del suelo, la interacción de la radiación solar con éste sigue diferentes patrones. Por ejemplo, los suelos arenosos tienen mayor reflectancia (relación entre la potencia electromagnética incidente y la reflejada) que los suelos arcillosos. Si mediante teledetección es posible conocer la composición de un suelo, entonces se pueden inferir propiedades como drenaje o cantidad de ma-

teria orgánica. Algunos de los parámetros que influyen en la reflectividad del suelo son: óxidos de hierro, humedad, materia orgánica, granulometría, mineralogía, material de origen, color, condiciones de drenaje interno y temperatura. Otro ejemplo es la alta absorción de radiación infrarroja cercana (NIR) por parte de los óxidos de hierro presentes en el suelo. También es conocido que a medida que aumenta el contenido de materia orgánica en el suelo, disminuye la reflectancia para longitudes de onda entre 400 y 2.500 nm (bandas de radiación visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio). Aún más, cuanto más descompuesta está la materia orgánica, más radiación absorbe. Por último, el suelo húmedo absorbe más radiación que el suelo seco o que el suelo con costra, tanto en el visible como en el infrarrojo cercano. Es el motivo de que el suelo húmedo adquiera un color más oscuro.

El objetivo de interés principal en la teledetección para agricultura es la vegetación, que ofrece diferentes patrones de absorción de radiación electromagnética, y por lo tanto diferentes patrones de reflexión. Las hojas son los componentes de la vegetación más representativos en las tareas de teledetección, puesto que constituyen la mayor parte de la superficie de las plantas expuesta a la radiación solar. Las hojas cumplen tareas de respiración, transpiración y fotosíntesis, y para esta última hacen uso de radiación visible. De toda la radiación solar que reciben, tanto luz directa como luz difusa, utilizan sólo ciertas longitudes de onda, siendo reflejada o transmitida a través de ellas. Habitualmente se emplean técnicas de teledetección que captan la luz reflejada, ya que para captar la radiación transmitida a través de las hojas se requieren equipos más complejos y la accesibilidad es menor. La medida de luz reflejada es, finalmente, una medida indirecta de la radiación absorbida, esto es, la de interés para conocer el estado de la vegetación.

La fotosíntesis es eficiente con luz azul (400-530 nm) y luz roja (600-730 nm), por lo que el resto de radiación, entre 530 y 600 nm es reflejada o transmitida. Estas longitudes de onda corresponden a los colores verdes y es el motivo de que éste sea el color de las hojas que los ojos humanos perciben. Otra de las bandas espec-

trales altamente reflejada por las hojas (hasta el 50%) es el infrarrojo cercano (NIR), en este caso por encima de los 730 nm y hasta los 1.100 nm (1,1  $\mu\text{m}$ ). Este hecho permite utilizar la banda NIR para lograr una diferenciación clara entre vegetación y otros elementos.

Igual que ocurre con el suelo, diferentes parámetros de las hojas influyen en la radiación que es reflejada, para cada especie y para diferentes estados nutricionales. Entre otros son: los pigmentos, el contenido de agua y de aire, el estado de maduración y las condiciones de iluminación. Por ejemplo, se puede inferir la edad de una planta ya que las hojas maduras absorben menos luz visible debido al deterioro de la clorofila. También se puede estimar el déficit hídrico, ya que las hojas con estrés hídrico ven aumentada su reflectancia. Igualmente, un déficit de nutrientes influye negativamente en la creación de clorofila y por lo tanto disminuye la radiación absorbida.

La definición de teledetección específica que la observación de los objetos se hace sin que exista contacto físico entre ellos y los sensores. No obstante, no se incluye ninguna restricción en las distancias de adquisición. Las plataformas en las que se montan los sensores de teledetección se clasifican en tres tipos: terrestres, aéreas o suborbitales y orbitales. Las terrestres pueden ser sistemas de adquisición manuales o transportados en vehículos; las aéreas o suborbitales pueden ser globos aerostáticos, helicópteros, aviones o cualquier otro tipo de aeronave; por último, las orbitales son los satélites artificiales, que por lo general se sitúan en órbitas bajas (LEO, *low Earth orbit*) o intermedias (MEO, *medium Earth orbit*). El tipo de plataforma empleada depende del objetivo que se quiere observar, pues cada una de ellas proporciona diferentes resoluciones espacial y temporal. Igualmente, los sensores de teledetección empleados en cada tipo de plataforma dependen del objetivo de la observación. Cada sensor particular tendrá una resolución espacial, radiométrica y espectral. En capítulos posteriores se explicarán los sensores utilizados en cada aplicación.

En la actualidad las dos principales plataformas orbitales para realizar tareas de teledetección agronómi-

ca son LANDSAT y SPOT. El programa estadounidense LANDSAT comenzó en el año 1972 con el objetivo de estudiar los recursos naturales. Hasta el momento (2010) se han puesto en órbita siete satélites de esta serie, de los que actualmente se encuentran operativos el LANDSAT 5 y el LANDSAT 7, mientras que el LANDSAT 6 no alcanzó su órbita debido a un fallo en el lanzamiento. Realizan diversas tareas: inventario agronómico, previsión de cosechas, evaluación y control de zonas regables, planificación de recursos hídricos, cartografía de suelos, estudio de litorales, geológicos y de glaciares, y control de contaminación de aguas y suelos. Por su parte, el programa SPOT, de origen europeo (Francia, Bélgica y Suecia), está compuesto en la actualidad de dos satélites (SPOT 4 y 5) y varias estaciones terrestres para recepción de los datos. Su finalidad es el estudio del uso del suelo y evolución del medio ambiente, evaluación de los recursos naturales, minería, trabajos cartográficos y topográficos. Existe una tercera plataforma para teledetección orbital, IKONOS, de una empresa estadounidense. Entró en funcionamiento a finales del siglo XX como plataforma de teledetección comercial y se caracteriza por proporcionar una alta resolución espacial. Todos estos satélites siguen una órbita polar heliosíncrona, lo que significa que el paso por el ecuador se realiza siempre a la misma hora local, con una trayectoria norte sur. Al realizarse la adquisición siempre a la misma hora es posible la comparación temporal de una misma región.

Los cuatro tipos de resoluciones de los sistemas de teledetección nombrados anteriormente son:

- Resolución espacial: consiste en el menor objeto detectable por el sistema sensor. Por ejemplo, en un sensor de imagen digital se trata de la superficie terrestre capturada por un solo píxel. En LANDSAT la resolución espacial es de 30x30 m, en SPOT de 20x20 m y en IKONOS de 4x4 m. Los sistemas suborbitales y terrestres consiguen, lógicamente, mayores resoluciones; es decir, distinguen objetos de menor tamaño (Figura 16).
- Resolución temporal: es la capacidad del sensor para detectar cambios temporales sufridos por una

misma superficie de estudio. Para las plataformas orbitales, depende de la periodicidad de los satélites sobre un mismo punto, mientras que para las plataformas terrestres y suborbitales no existe restricción alguna. En LANDSAT es de 16 días y en SPOT de 26 días.

- Resolución radiométrica: indica la capacidad del sensor de diferenciar distintos niveles de intensidad de la radiación capturada. En sistemas de imagen se trata del número de niveles de gris que pueden obtenerse.
- Resolución espectral: es la capacidad del sensor para distinguir diferentes longitudes de onda en la radiación electromagnética recibida. Para cada sensor se especifican el número de bandas y su anchura: los sistemas multispectrales constan de entre 2 y 10 bandas mientras que los hiperespectrales van desde las 10 bandas a más de 100. En función de la aplicación es interesante disponer del mayor número de bandas y/o de la menor anchura de banda posibles.

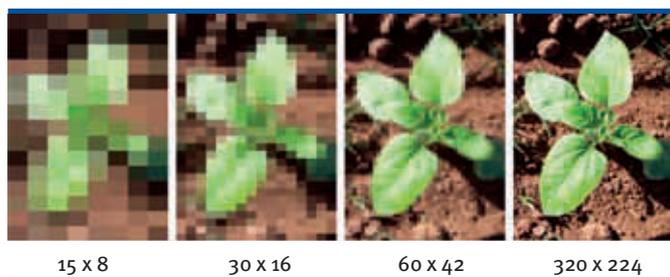


Figura 16. Efecto del cambio de resolución espacial (píxeles) para una imagen en color capturada desde una plataforma terrestre

El producto de los sensores de teledetección se representa, según su tipo, como conjuntos de datos o como imágenes. Del mismo modo, el tratamiento de esta información se puede realizar mediante análisis estadístico de los datos, análisis visual de las imágenes o procesamiento digital de las imágenes o de los datos.

Para procesar datos de teledetección capturados con plataformas terrestres o aéreas, es habitual la utilización de índices. Éstos permiten sintetizar la información de diferentes bandas espectrales y maximizar las propiedades que se quieren resaltar y estudiar de ciertos objetos. Por ejemplo, para maximizar la diferencia-

ción entre la vegetación y el suelo, es decir, para realzar el contraste, se emplean índices de vegetación, que resultan de transformaciones lineales de la reflectancia obtenida para dos o más bandas espectrales. Los dos más característicos son el RVI (*ratio vegetation index*) y el NDVI (*normalized difference vegetation index*). El RVI se obtiene como cociente de las reflectancias de la banda infrarroja cercana y la banda roja, es decir, NIR/R. El NDVI se calcula como  $(NIR-R)/(NIR+R)$ , el cociente de la resta y la suma de las bandas infrarroja y roja, respectivamente. Estos índices aprovechan, por una parte, la alta reflectancia de la vegetación en la banda NIR y, por otra, la baja reflectancia en la banda roja, ya que ese tipo de radiación se emplea en la fotosíntesis.

El análisis de los datos capturados por los sensores que producen imágenes se realiza mediante inspección visual de dichas imágenes o mediante procesamiento digital. Este procesamiento se puede aplicar tanto a las imágenes provenientes de plataformas orbitales como de plataformas suborbitales y terrestres. Únicamente se deben tener en cuenta ciertas características de las imágenes inherentes a cada plataforma. Por ejemplo, las plataformas orbitales producen ciertos errores debidos, entre otras causas, al guiado de los satélites.

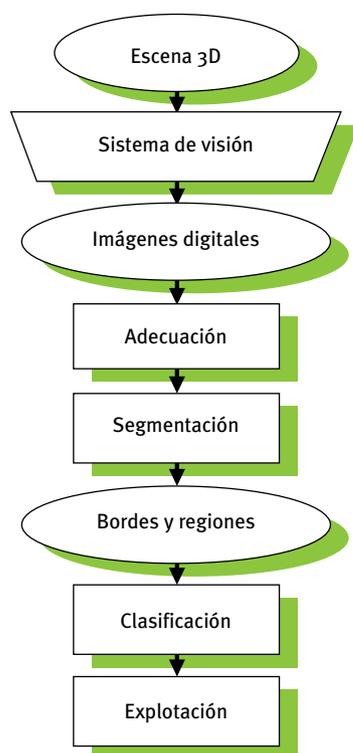
### 1.3.4.2 Visión artificial

La interpretación automática de imágenes para realizar tareas de automatización recibe el nombre de visión artificial o visión por computador. Se trata de otra de las formas de análisis de los datos obtenidos mediante teledetección, en este caso con sensores que producen imágenes. Se basa en el procesamiento digital de las imágenes mediante un ordenador y su primer objetivo es la identificación y el análisis de los objetos contenidos en una escena. En segundo lugar, y de forma más general que en el campo de la teledetección, se puede llevar a cabo de forma más o menos automática una actuación a partir de la información obtenida, mediante la generación de órdenes a diferentes elementos actuadores electromecánicos. La visión artificial se puede englobar en el campo de la inteligencia artificial, esto es, el conjunto de técnicas informáticas que tratan de emular los modelos de pensamiento racional.

Además del procesamiento de imágenes remotas de aeronaves y satélites, por ejemplo para medir áreas de cultivo, para estimar su estado nutricional o controlar el riego, se están desarrollando sistemas de teledetección sobre plataformas terrestres que no sólo realizan observaciones sino que, en tiempo real, procesan las imágenes, toman decisiones y llevan a cabo diferentes tareas. De este modo, no sólo se realizan mapas de los cultivos sino que se aplican soluciones en el mismo instante de la observación, por ejemplo el desbrozado o pulverizado selectivo y el guiado automático o asistido de los vehículos agrícolas.

Todo procesamiento de imágenes digitales para extracción y análisis de su información comprende los mismos pasos fundamentales, según la Figura 17.

**Figura 17. Esquema de procesado de imágenes digitales en tareas de visión artificial**



La adecuación de las imágenes consiste en aplicar diferentes técnicas para mejorar sus propiedades de cara al análisis posterior. Son varias las herramientas de preprocesado habituales: mejora del contraste,

mediante ecualización del histograma<sup>1</sup>, por ejemplo, eliminación de ruido (error debido a los sistemas y a las condiciones de adquisición), realce de bordes o conversión a falso color. Esta última técnica consiste en combinar diferentes bandas espectrales en una sola mediante la asignación de distintas componentes de color a cada una. Con ello se obtiene una imagen con colores no reales pero que permite diferenciar más fácilmente los objetivos de interés. Esta técnica se emplea principalmente para un posterior análisis visual.

La fase de segmentación consiste en separar los objetos de interés presentes en una imagen del fondo o medio en el que se encuentran. Para ello se utilizan diferentes propiedades o características como el nivel de gris o intensidad, color, textura, bordes o movimiento. Por ejemplo, la detección de bordes se realiza habitualmente con herramientas de tipo gradiente, que tratan de localizar saltos de contraste en cada pequeña porción de una imagen. El resultado final son los bordes de los objetos, que más tarde deben interpretarse. Existen técnicas específicas para detección de líneas rectas o circunferencias, si esto son los objetivos que se tratan de localizar. Es el caso de la transformada de Hough, que habitualmente se aplica para detectar líneas rectas en una imagen. En cuanto a las texturas, es decir, a los patrones visuales que siguen las superficies de un mismo objeto, resultan muy útiles para la detección de masas de vegetación. Sin embargo, es preciso contar con una buena resolución espacial para que la extracción de la textura sea eficiente.

Una técnica muy habitual para realizar la segmentación de regiones es la aplicación de umbrales o umbralización sobre el histograma de una imagen. En la banda espectral adecuada o en una combinación de ellas, los objetos y el fondo forman diferentes modos o picos en el histograma de los niveles de intensidad. Este hecho permite separar objetos y fondo, con cierto error según las propiedades de cada imagen,

<sup>1</sup> El histograma de una imagen es la representación gráfica de la frecuencia de aparición de cada uno de los niveles de gris o de intensidad

estableciendo uno o varios umbrales entre los diferentes modos. Existen diferentes métodos, manuales y automáticos, para determinar el umbral; el más sencillo consiste en buscar el valor mínimo del histograma entre dos máximos. También se puede determinar mediante medidas iterativas para comprobar qué umbral ofrece la máxima separabilidad o diferenciación de los modos. Finalmente, algunos métodos más elaborados son el de Otsu, el uso de la entropía del histograma o la iteración recursiva.

La segmentación de regiones también puede realizarse mediante crecimiento de regiones: a partir de una semilla o punto inicial se van localizando puntos vecinos con valores parecidos; esos puntos se agregan a la región y a su vez se buscan nuevos vecinos similares. El crecimiento de la región se detiene cuando no se localizan nuevos puntos similares de acuerdo a unos umbrales predefinidos. Otro método basado en la similitud de valor es el agrupamiento o *clustering*, que no tiene en cuenta la relación de vecindad entre píxeles sino la cercanía en la escala de grises o en el espacio de color utilizado.

El resultado de la segmentación de una imagen es otra binaria, del mismo tamaño y resolución en la que los píxeles toman únicamente los valores 0 y 1. Sobre esta imagen binaria se pueden llevar a cabo diferentes medidas, como el área de los objetos, su perímetro, su elongación, etc. Además, las transformaciones morfológicas permiten aplicar correcciones y mejoras sobre las imágenes binarias, como la reducción de ruido, la separación de objetos conectados o la unión de partes de un mismo objeto. Las transformaciones morfológicas típicas son: erosión, dilatación, apertura, cierre y esqueletización.

Las características de los objetos extraídas con las herramientas anteriores conforman los descriptores de dichos objetos. A estos descriptores se les aplica un clasificador para asignar cada objeto a una categoría o clase conocida. Ejemplos de clases serían las especies de cultivo cuando se estudia la superficie ocupada por los diferentes cultivos en una región. Los clasificadores pueden ser más o menos complejos, dependiendo de la complejidad de los descriptores y de las clases

en sí. Por ejemplo, el clasificador Bayesiano es de tipo estadístico y utiliza funciones discriminantes para la asignación de clases. También el método de agrupamiento es una herramienta de clasificación. Finalmente, son destacables las redes neuronales como herramientas de clasificación.

Las aplicaciones más recientes de la visión artificial en la agricultura de precisión, además de la teledetección desde plataformas orbitales para creación de mapas, están relacionadas con la captura de imágenes a corta distancia en los cultivos. Una de estas aplicaciones es la asistencia al guiado o el guiado automático. Existen diferentes variantes, por ejemplo el guiado mediante la detección del límite entre una zona tratada y la zona contigua sin tratar. También se están desarrollando técnicas de visión artificial para el guiado de tractores mediante detección de las filas de siembra en cultivos en línea (Figura 18 a). En todo caso, se puede combinar el procesamiento de imágenes con la utilización de una señal de posicionamiento, como el GPS.

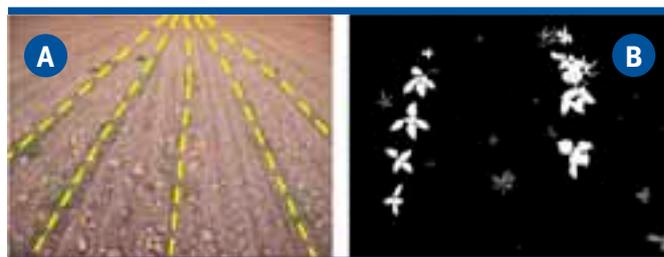


Figura 18. Procesado de imágenes para: (a) guiado de vehículos agrícolas y (b) detección de malas hierbas

Otra aplicación es la detección de diferentes especies y, en concreto, la diferenciación de las especies cultivadas y de las malas hierbas que surgen de forma espontánea dentro del cultivo (Figura 18 b). Se pueden utilizar, por ejemplo, métodos que analizan la morfología de las hojas de las plantas, que estudian la textura de las diferentes coberturas o que tratan de seguir un determinado patrón de siembra. El resultado final y la aplicación de la detección pueden ser el desbrozado mecánico selectivo o la aplicación selectiva de diferentes productos como herbicidas. Todo ello permite reducir costes de combustibles y de insumos y el impacto ambiental que éstos provocan.



## 2 Ahorro y eficiencia energética derivados del control electrónico en tractor

---

### 2.1 Ahorro de combustible en el tractor usando técnicas de agricultura de precisión

#### 2.1.1 Las emisiones contaminantes de los motores de los tractores

Las emisiones nocivas de los motores dependen de las condiciones de funcionamiento del motor. Si el proceso de combustión fuera perfecto, los gases de escape estarían constituidos por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), vapor de agua y nitrógeno gaseoso ( $\text{N}_2$ ), aunque generalmente esto no ocurre, produciéndose una variedad de gases de escape: monóxido de carbono (CO), hollín (carbono puro), hidrocarburos (combustible sin quemar,  $\text{H}_n\text{C}_m$ ), aldehídos (RCHO), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), sin contar con el dióxido y el trióxido de azufre ( $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_3$ ) y el sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) en los casos en los que los combustibles contengan trazas de azufre. El hollín (carbono puro) que emite el motor tiene forma de humo visible cuando se emite en cuantías superiores a  $120\text{-}130\text{ mg/m}^3$  y se convierte en humo negro para valores superiores a  $600\text{ mg/m}^3$ .

Los motores diésel operan en condiciones de exceso de oxígeno, y de ahí la producción de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), aunque según la uniformidad de la inyección pueden producirse simultáneamente patrones de combustión incompleta que dan lugar al mencionado monóxido de carbono (CO). La cantidad de  $\text{NO}_x$  puede reducirse realizando la inyección del combustible más tarde, aunque esto incrementa el consumo de combustible por imposibilidad de quemarlo completamente. Por este motivo la posibilidad de recircular parcialmente los gases de escape, tal y como ocurre en algunos motores, favorece la eliminación del monóxido de carbono limitando las proporciones de óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) emitidas al ambiente.

El consumo de combustible y las emisiones de un motor dependen fundamentalmente del régimen y del par de motor. Es obvio que los vehículos agrícolas operan bajo una gran variedad de condiciones, y la adecuada selección de la relación de transmisión y el régimen

del motor dependen de la experiencia del operario. Se ha comprobado que en numerosas ocasiones los vehículos agrícolas trabajan con marchas más cortas de lo necesario, provocando un régimen elevado en el motor.

Los ensayos de campo para el estudio de las emisiones de los motores de vehículos agrícolas son caros y exigentes en tiempo y dinero, y puede decirse que es casi imposible medir y controlar todas las variables que influyen en dichas emisiones, por lo que la simulación aparece como una alternativa factible, ya muy desarrollada en la industria automovilística, pero menos en los estudios de los vehículos y labores agrícolas.

Uno de los trabajos de referencia en el mundo del tractor ha sido realizado por Lindgren y Hansson (2002), que proponen una metodología de simulación para estudiar los efectos de las estrategias de control del motor y de las transmisiones en las emisiones de los tractores agrícolas. La metodología de simulación contempla labores de transporte y laboreo, calculando las emisiones instantáneas para diferentes escenarios de carga y régimen del motor respecto a velocidad del vehículo, aceleración, ...

Un resultado general de esta investigación fue la constatación de que las estrategias de conducción y las características de las transmisiones pueden afectar de forma considerable a las emisiones, sin afectar al tiempo o consumo de combustible de la operación.

Se observó que una disminución del 20% a nivel de la reducción final en las ruedas motrices produce una disminución de la cantidad de hidrocarburos y CO emitidos, aunque incrementa la cantidad de óxidos de nitrógeno producidos durante las operaciones de transporte (Tabla 4).

**Tabla 4. Diferencias en el consumo de combustible y en las emisiones de gases según los diferentes escenarios de simulación con respecto al escenario de referencia para transporte (tabla superior) y para una labor de gradeo (tabla inferior).** (Fuente: Lindgren y Hansson, 2002)

<b>Transporte</b>				
Modificación	Diferencia con respecto a la situación de referencia (%)			
	Consumo combustible	CO	NO <sub>x</sub>	HC
Disminución del 20% de la reducción final	-2	-10	12	-19
CVT 1400 rpm	-14	-22	13	-37
CVT 1600 rpm	-6	-15	16	-26
CVT 1800 rpm	-2	-10	13	-16
CVT 2000 rpm	0	3	6	-7

<b>Laboreo</b>				
Modificación	Diferencia con respecto a la situación de referencia (%)			
	Consumo combustible	CO	NO <sub>x</sub>	HC
Disminución del 20% de la reducción final	0	-1	0	-1
CVT 1400 rpm	-10	-14	3	-22
CVT 1600 rpm	-3	-2	3	-7
CVT 1800 rpm	1	4	-4	2

Por otra parte, en ese artículo se evalúa el uso de una transmisión continuamente variable (CVT) que mostró una gran influencia en los niveles de emisiones. Esta transmisión puede ajustarse para obtener la combinación más favorable de régimen y par para cada tipo de carga, mostrando, de acuerdo con la simulación, una disminución en el consumo de combustible y en las emisiones de CO e hidrocarburos, mientras las emisiones de NO<sub>x</sub> (muy relacionadas con el par del motor y la temperatura de combustión) aumentaron con el descenso del régimen del motor, tanto en el transporte como en el laboreo. Se observa, por tanto, que la estrategia ha de ser una cuestión de prioridades, porque según estos resultados no es posible reducir los niveles de NO<sub>x</sub> y simultáneamente los niveles de HC y CO.

Según los resultados de las simulaciones, los valores de régimen de motor que Lindgren y Hansson proponen en 2002 como recomendables para reducir los niveles de emisión, se sitúan en torno a 1.400 rpm. Cabe destacar que algunos de los tractores actualmente comercializados, tales como el Fendt 211, recientemente evaluado en un ensayo de campo por las autoras de este artículo, tienden a ceñirse a este valor recomendado. Esto demuestra que las conclusiones que se obtienen en estos trabajos de investigación llegan a derivar en recomendaciones prácticas de uso de gran utilidad para los fabricantes de tractores.

### 2.1.2 Adquisición de datos y análisis de los parámetros de funcionamiento de los motores

El trabajo que se resume en este apartado (Juostas y Janulevicius, 2009), ha evaluado 12 tractores con potencias entre 135 y 250 CV, todos ellos con un régimen nominal de 2.300 rpm y un número de horas de utilización de motor acumuladas entre 451 y 4.927 (ver Tabla 5), empleando para ello el procedimiento de acceso a las bases de datos de las ECUs.

En la Figura 19 se muestran las curvas características del motor de uno de los modelos estudiados (nótese que se trata de un motor EURO II y no de los actuales EURO IV, aunque la metodología expuesta es altamente valiosa). En dichas curvas se alcanza la potencia máxima del motor a 1.800 rpm, correspondiendo la potencia nominal a un régimen de motor de 2.300 rpm. Los niveles más bajos de consumo específico se alcanzan entre 1.450 y 1.750 rpm.

Uno de los aspectos destacables de este estudio es la evaluación del nivel de carga al que trabajan los tractores en continuo durante su vida de trabajo, en aquellos modelos que disponen de controlador electrónico del motor (EMR, *Electronic Engine Control*) que ofrece información relativa al régimen del motor, al par, al número de horas de trabajo, etc. Las unidades electrónicas de control del motor (ECUs) se han convertido en una parte estándar de la moderna tecnología de automoción que puede aportar información vital en el análisis de las condiciones de trabajo reales en campo.

En este artículo publicado en 2009, se utiliza el conector de diagnóstico y un software de comunicación específicos del fabricante para acceder a las distintas ECUs de los tractores, siendo el número de parámetros accesible un aspecto dependiente de las características de cada ECU según modelos.

Figura 19. Curvas de motor certificadas

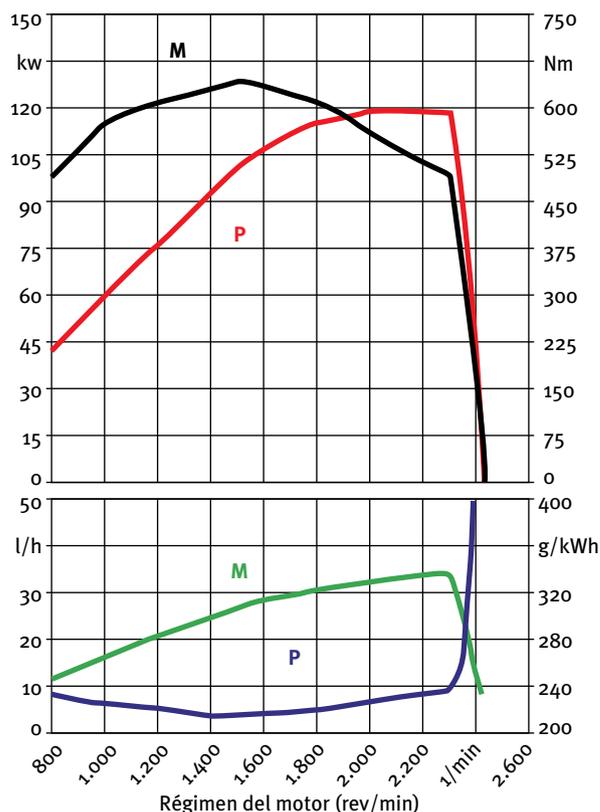


Tabla 5. Características y número de horas de uso evaluadas en el trabajo de investigación de Juostas y Janulevicius publicado en 2009

Tractor nº	Potencia y régimen nominales	Horas acumuladas de uso del motor
1	135/2.300	2.758
2	150/2.300	2.270
3	150/2.300	2.021
4	160/2.300	2.315
5	160/2.300	2.363
6	200/2.300	3.997
7	198/2.300	451
8	230/2.300	4.913
9	230/2.300	4.927
10	231/2.300	3.237
11	250/2.300	1.653
12	250/2.300	1.495

Una vez descargados los datos, el procedimiento de análisis propuesto por Juostas y Janulevicius (2009) consiste en clasificar el porcentaje de horas de utilización en función del régimen del motor (<1.000 rpm, 1.000-2.000 rpm, >2.000 rpm) y del porcentaje de par máximo requerido por la labor (<30%, 30-50%, >50%), de manera que se obtienen en total 9 combinaciones (3 x 3) que pueden expresarse tanto en número total de horas como en porcentaje de horas acumuladas, siendo la suma de las 9 posibilidades el 100% para cada tractor.

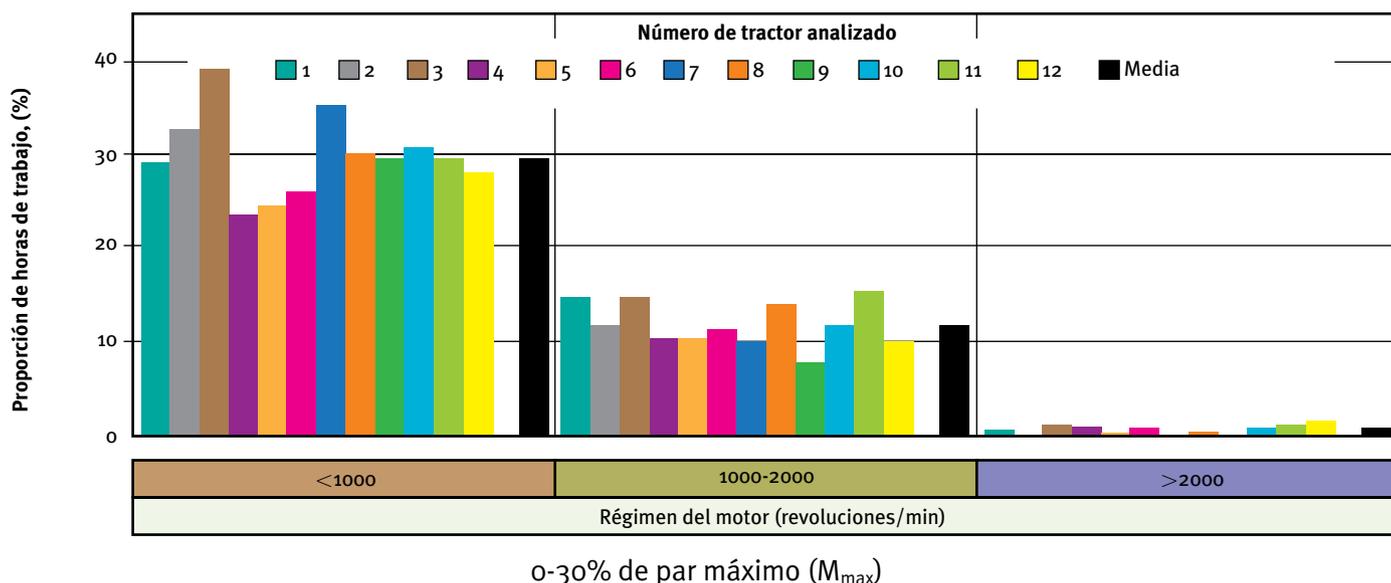
La Figura 20 muestra el porcentaje de horas de trabajo correspondientes a cada una de las 9 situaciones anteriormente mencionadas para los 12 tractores evaluados. Teniendo en cuenta que las condiciones económicas de uso del motor se corresponden con un par superior al 50% del par máximo ( $M_{max}$ ) y regímenes de motor medios (1.000-2.000 rpm), el trabajo concluye que en términos generales apenas el 20% del tiempo de uso de los tractores se sitúa en estas condiciones económica y ambientalmente aceptables. Los porcentajes de utilización de los tractores en las zonas aceptables (más de 50% del  $M_{max}$  y regímenes de entre 1.000-2.000 rpm o superiores a 2.000 rpm) se sitúa entre el 37 y el 52%, lo que en todo caso indica

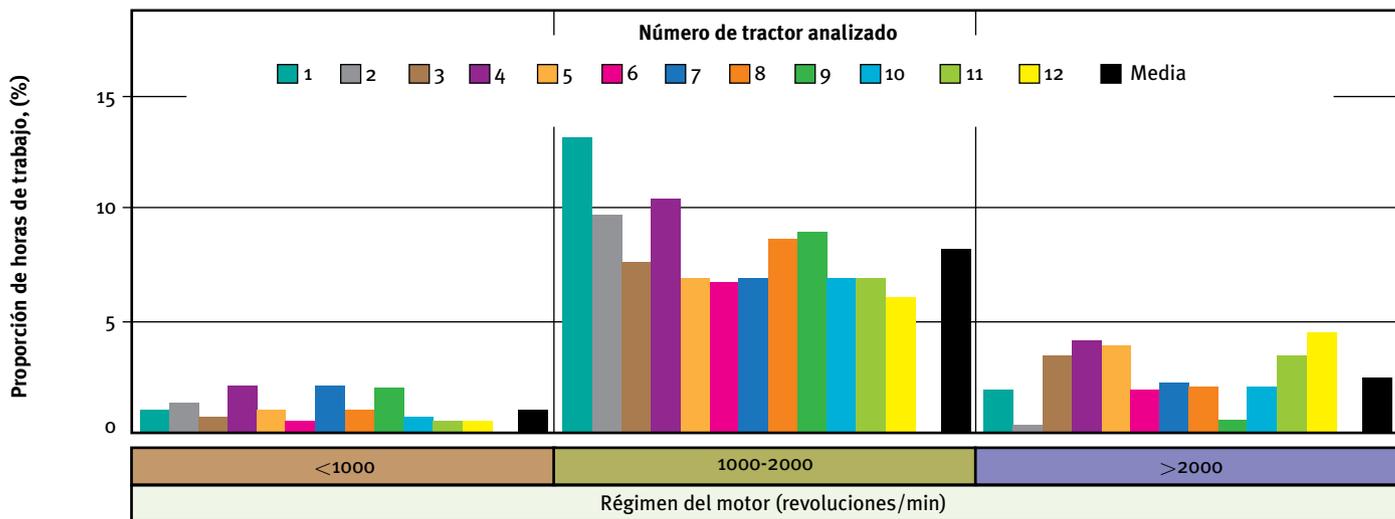
que más de la mitad del tiempo de uso de todos los tractores evaluados se produce en condiciones poco razonables.

El transporte entre parcelas de trabajo, que es una tarea imprescindible, puede suponer en torno a un 10 o 15% del tiempo total de trabajo del tractor en condiciones de 0-30%  $M_{max}$  y regímenes de motor inferiores a 1.000 rpm; es decir, condiciones energética y ambientalmente ineficientes. Sin embargo, en este estudio se ha obtenido en todos los tractores evaluados más de un 30% de tiempo total de trabajo en estas condiciones y no ha sido posible, mediante encuestas dirigidas a los usuarios, explicar las causas de este hecho. Todo ello indica que existe un amplio margen de mejora, no ya en los motores en sí, sino en las condiciones habituales de uso de los mismos, que pueden ser tan determinantes como pequeñas variaciones en el óptimo de consumo específico a nivel de diseño en fábrica.

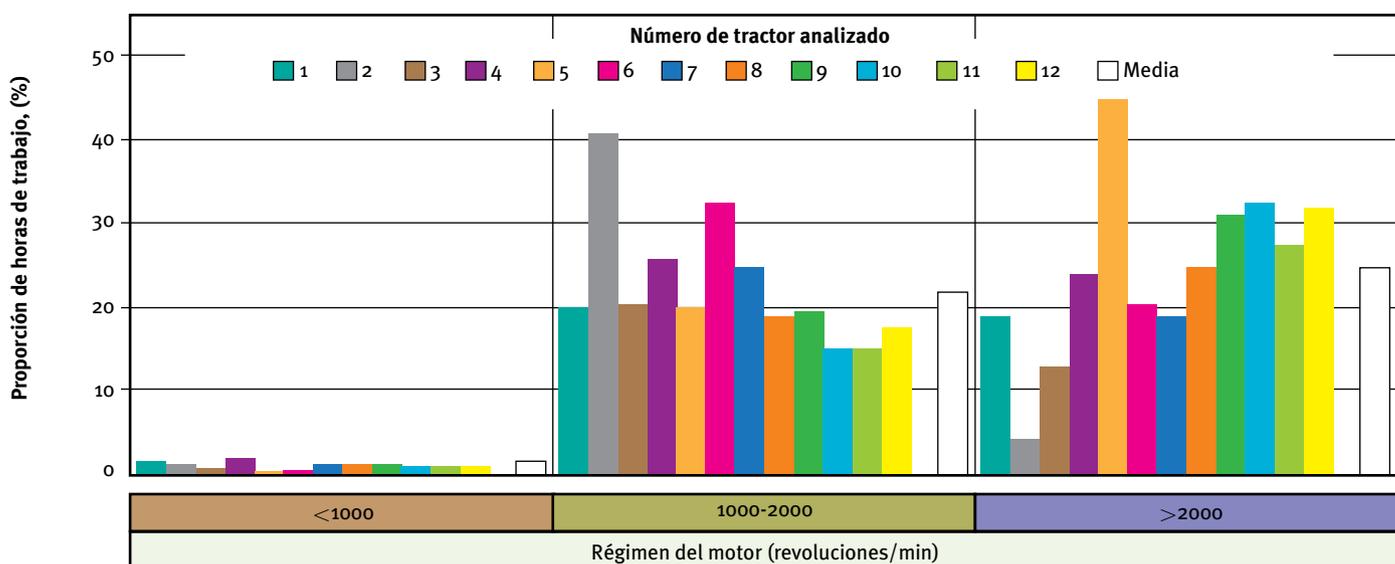
Los datos anteriores pueden resumirse en un gráfico que exprese la dispersión existente entre tractores para las 9 categorías de trabajo definidas por los autores (Figura 21). Esta representación subraya las diferencias existentes en el uso de los tractores a nivel individual y hace, si cabe, más valiosa la información recogida.

**Figura 20. Resultados publicados por Juostas y Janulevicius en 2009, relativos a un total de 32.400 horas de trabajo acumuladas de 12 tractores. Para cada tractor el 100% de tiempo de uso se divide en 9 categorías correspondientes al producto de 3 rangos de régimen de motor (<1.000 rpm, 1.000-2.000 rpm, >2.000 rpm) combinadas con tres rangos de demanda de par (<30%  $M_{max}$ , 30-50%  $M_{max}$ , >50%  $M_{max}$ )**



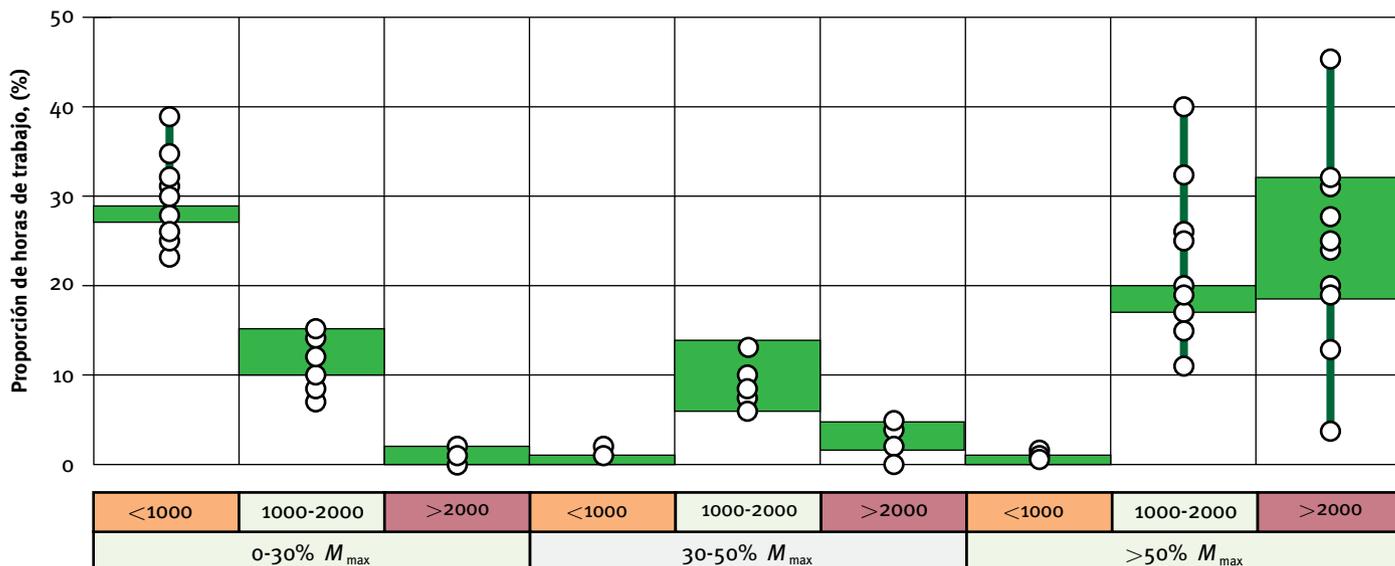


30-50% de par máximo ( $M_{max}$ )



Más del 50% par máximo ( $M_{max}$ )

**Figura 21. Resumen de la variabilidad obtenida para los 12 tractores correspondiente a las 9 condiciones de trabajo consideradas: 3 rangos de régimen de motor (<1.000 rpm, 1.000-2.000 rpm, >2.000 rpm) combinadas con tres rangos de demanda de par (<30%  $M_{max}$ , 30-50%  $M_{max}$ , >50%  $M_{max}$ ). (Fuente: Juostas y Janulevicius, 2009)**



### 2.1.3 Mapeo del consumo de combustible

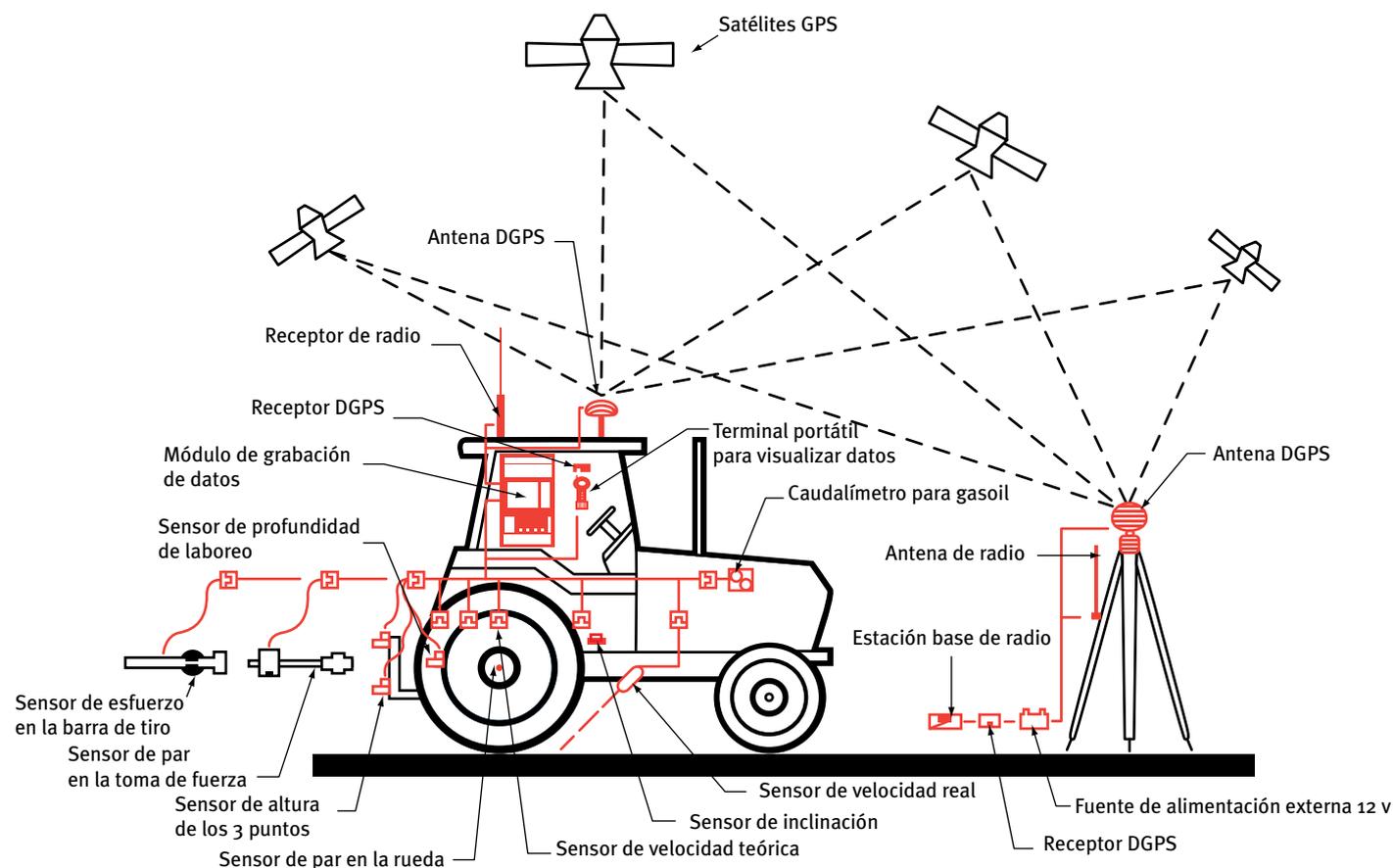
Por otra parte, los espectaculares avances que se han producido en los últimos años en los campos de la electrónica y las tecnologías de la información han simplificado la adquisición de datos relativos a los parámetros de funcionamiento de los tractores en el desempeño de sus labores en campo. El sector muestra un interés creciente en la integración de esta información con los sistemas de posicionamiento global diferencial (DGPS). Así, Yahya y colaboradores (2009), proponen un sistema integral capaz de medir, mostrar y almacenar, en tiempo real, entre otros parámetros, las velocidades real y teórica de avance, el deslizamiento de las ruedas, la fuerza de tiro, el par en la toma de fuerza, fuerzas en el enganche a los tres puntos y el consumo de combustible (Figura 22). Adicionalmente el sistema es capaz de identificar, mostrar en tiempo real y almacenar las coordenadas de localización (°N,E

o UTM) del conjunto tractor-implemento en el campo relacionándola con el conjunto de medidas antes mencionadas. Los mapas de variabilidad espacial de estas variables se obtienen fácilmente con un procesamiento posterior de los datos con cualquier programa comercial de GIS (Figura 23 y Figura 24).

Este procedimiento supone una evolución notable en la forma de pensar, ya que hasta el momento sólo se consideraban los aspectos de la parcela (compactación, humedad, fertilidad, productividad superficial, ...) como aspectos susceptibles de ser evaluados espacial (a nivel subparcelario) y temporalmente (a lo largo de las distintas campañas). El hecho de incorporar información relativa a los tractores/máquinas e implementos puede ser vital para establecer las consecuencias sostenidas de este tipo de labor, y por tanto para elaborar estrategias medioambientalmente sostenibles: reducir la erosión y el consumo energético.

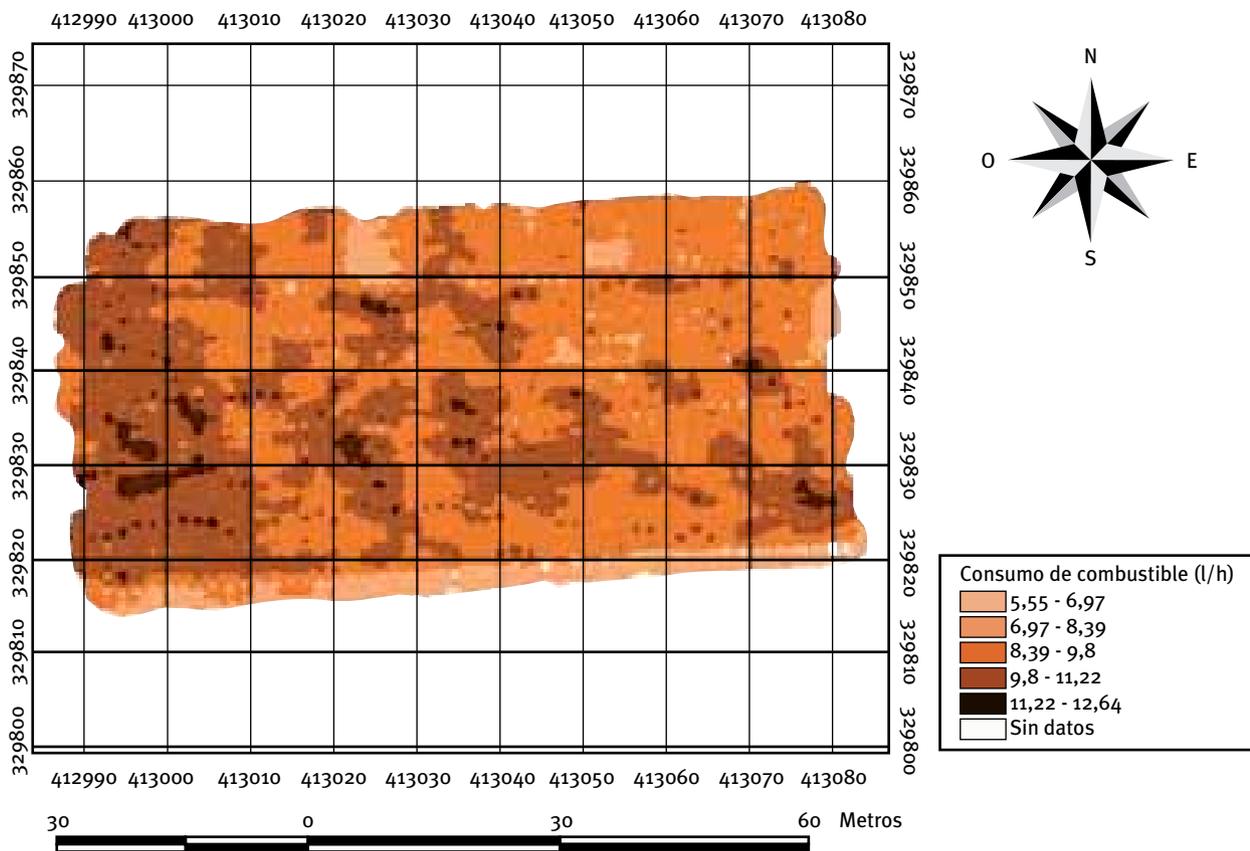
**Figura 22. Esquema de los sensores distribuidos en el tractor para la medida de los diferentes parámetros de funcionamiento durante la realización de una labor de arada con discos, y del sistema DGPS.**

(Fuente: Yahya y colaboradores, 2009)



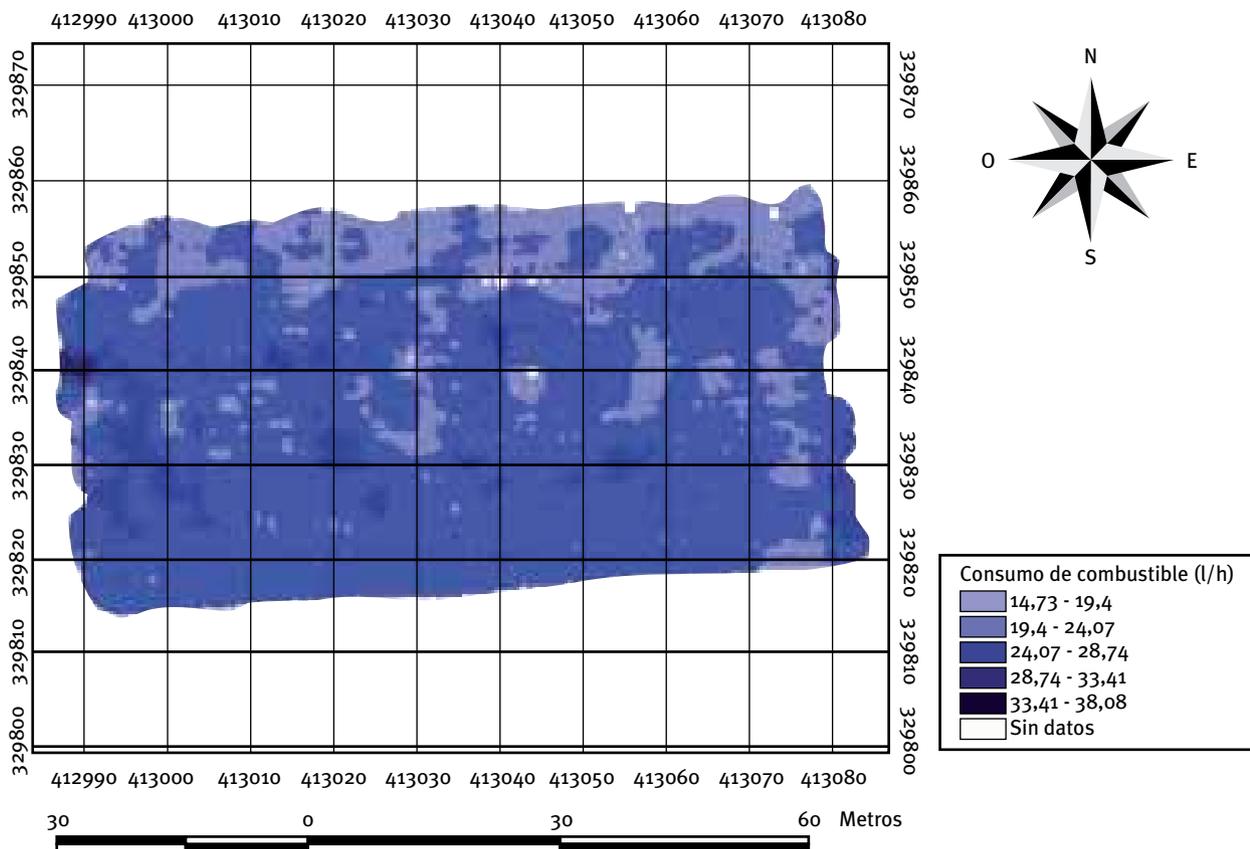
**Figura 23. Mapa de variabilidad espacial del consumo de combustible (l/h) en una labor de alzada con arado de discos.**

(Fuente: Yahya y colaboradores, 2009)



**Figura 24. Mapa de variabilidad espacial de la profundidad de trabajo (cm) en una labor de alzada con arado de discos.**

(Fuente: Yahya y colaboradores, 2009)



El análisis de los mapas de actividad del tractor puede establecer conclusiones inmediatas. A modo de ejemplo, observando los mapas de consumo de combustible y profundidad de trabajo (Figuras 23 y 24) pueden encontrarse ciertas correspondencias espaciales: el aumento en la profundidad de unos 17 cm (color más claro en el mapa) a unos 35 cm (colores más oscuros en el mapa) supone un incremento al doble en el consumo de combustible (de 6 a 12 l/h aproximadamente).

Las posibilidades de la supervisión continua y georreferenciada de los parámetros de funcionamiento del motor y del tractor constituyen una potente herramienta para profundizar, ratificar o matizar estudios previos, como el de Serrano y colaboradores (2007) en el que se demuestra que el consumo de combustible en las operaciones de laboreo se minimiza con regímenes del motor comprendidos entre el 70 y el 80% del régimen nominal y usando relaciones de marchas largas. Por otra parte facilitará la realización de estudios particularizados para cada explotación evitando en lo posible generalizar recomendaciones de uso indiscriminadamente.

#### 2.1.4 A modo de conclusión

A título de conclusión nos gustaría indicar que existe un amplio margen de mejora en la reducción de consumo energético combinando los sistemas automatizados de gestión del motor y las transmisiones con procedimientos de análisis real en campo a nivel subparcelario (mapas de calidad de la labor y consumo). Es previsible en un futuro a muy corto plazo, que una amplia mayoría de los tractores se adhieran a estas estrategias con potencialidad para mejorar enormemente el consumo de combustible en comparación con las situaciones de conducción manual.

## 2.2 Control de rodada (*controlled traffic farming*) empleando técnicas de agricultura de precisión

La eficiencia en el contexto de la maquinaria agrícola generalmente se asocia a mayores capacidades de trabajo, conseguidas a base de aumentar el peso y la potencia de los equipos. Así, el trasiego con trayectorias

aleatorias de pesadas máquinas es una práctica muy común en las explotaciones actuales, produciendo la temible compactación del suelo, que reduce su conductividad hidráulica, porosidad y aireación y aumenta su densidad aparente. Buena parte de los trabajos de laboreo profundo que se realizan son necesarios debido a la compactación causada por el tráfico de maquinaria pesada. Por otro lado, el aumento de la capacidad de los tractores condujo a aumentar la intensidad del laboreo, acentuando los problemas de erosión y degradación textural del suelo. Tratando de paliar estos problemas se han ido introduciendo sistemas que reducen la intensidad del laboreo y gestionan el control de rodada.

### 2.2.1 Concepto de control de rodada

La idea de control de rodada (*controlled traffic farming*, CTF) nació, probablemente, en los años cincuenta, como medio para minimizar el efecto de la compactación del suelo por la rodada de los vehículos agrícolas (Taylor, 1994). Sin embargo, no es hasta los años ochenta cuando comienza a estudiarse este concepto más profundamente (Taylor, 1986, Chamen *et al.* 1988, etc.). Así, se define el control de rodada como un sistema de producción de cultivo en el que la zona cultivada y las líneas de rodada de la maquinaria están clara y permanentemente separadas (Taylor, 1994). El sistema establece que no existe laboreo en las líneas de rodada y que son exclusivamente utilizadas para los recorridos de las ruedas año tras año y en las diferentes operaciones de cultivo (Figura 25). Se tienen así dos áreas de manejo, las líneas de rodada y las zonas de cultivo, que pueden ser gestionadas para optimizar respectivamente la “traficabilidad” y el rendimiento del cultivo. La pretensión es que los cultivos se beneficien de un suelo no compactado y los vehículos agrícolas de una superficie altamente compactada.

En sus inicios, el control de rodada se encontró con reticencias y no fueron pocos los escépticos que no creyeron en él; sin embargo, la adopción de esta técnica en los últimos años ha sido notablemente rápida, sobre todo en países como Australia, en los que se ha visto que los sistemas tradicionales de tráfico

de vehículos agrícolas provoca la degradación de los suelos de cultivo, mientras que el control de rodada se demuestra medioambientalmente eficiente (Tullberg *et al.*, 2004).

Hay que indicar que otra técnica que suele aparecer asociada al control de rodada es el no laboreo, que en condiciones normales reduce el número de operaciones aunque no evita que la maquinaria tenga que seguir pasando por las zonas de cultivo en los momentos de siembra y cosecha, con la siguiente compactación del suelo.



Figura 25. En fincas con control de rodada, las líneas de cultivo y las de recorrido de la maquinaria están claramente separadas. (Fuente: [www.controlledtrafficking.com](http://www.controlledtrafficking.com))

### 2.2.2 Beneficios del control de rodada

Experimentos de campo han demostrado el amplio porcentaje de superficie cubierto por alguna rodada a lo largo de todo un ciclo de cultivo, desde la preparación del suelo hasta la recolección. En sistemas de laboreo convencional hasta el 96% del total del área de cultivo está cubierta por alguna rodada. En los sistemas de laboreo de conservación el área cubierta por las ruedas se reduce al 65%. Y en caso de combinar estas técnicas de laboreo y de control de rodada, el área cubierta pasa a ser de entre el 15 al 30% (Masek *et al.* 2009, Tullberg *et al.*, 2004). Si se considera además, que en un suelo labrado la primera de cuatro pasadas es la más crítica, dado que provoca el 75% del cambio de densidad aparente y hundimiento medido, se percibe mejor la intensidad del problema de reducir las rodadas. Es de interés añadir que se estima que la mitad de la potencia de-

sarrollada por los tractores en los sistemas de laboreo convencional se desperdicia en la compactación del suelo.

#### 2.2.2.1 En el suelo

En los vehículos agrícolas se considera que la energía perdida en ineficiencia de tracción o resistencia a la rodadura se sitúa entre los 3 y los 6 kJ/m<sup>2</sup> (expresado por unidad de área de rodada). La energía es disipada en la deformación del suelo: la componente vertical representando la resistencia de rodadura, y la componente horizontal el resbalamiento. Numerosos autores han demostrado que el paso de vehículos agrícolas aumenta la resistencia del suelo y la potencia a la barra requerida para las diferentes tareas de cultivo. Así, ensayos de campo muestran que las fuerzas de tiro requeridas en los cuerpos de siembra que se sitúan detrás de las ruedas del tractor y de la máquina son entre 1,6 y 2,2 veces superiores a las del resto de los cuerpos (Tullberg, 2000).

El efecto más obvio de esta disipación de energía en los suelos es la huella de la rueda; sin embargo, la energía es fundamentalmente absorbida en la deformación de las partes más blandas del perfil, lo que puede ocurrir en las capas superficiales, pero también en las capas más profundas y de mayor contenido en humedad. Estas últimas no están afectadas por el laboreo poco profundo ni por la siembra/trasplante/plantación, lo que origina un grave problema, porque la rectificación mecánica de esta compactación profunda es muy costosa.

En trabajos llevados a cabo en un suelo tipo vertisol degradado tras varias campañas de laboreo tradicional, se ha comprobado tras tres años de implementación de un sistema de control de rodada y no laboreo el aumento de su capacidad de reserva de agua (de 30 a 45 mm considerando los primeros 30 cm del perfil). Sin embargo, una única pasada de tráfico rodado bastó para devolver la zona de cultivo a niveles similares a los de la línea de rodada (McHugh *et al.*, 2003).

La infiltración y la escorrentía son parámetros que también se ven afectados en las experiencias de control de

rodada, así en parcelas de tráfico aleatorio la escorrentía media anual alcanza un 44% más que en las parcelas con control de rodada, siendo más beneficioso el efecto de control de rodada que el no laboreo frente al laboreo convencional.

### 2.2.2.2 En el ahorro energético y los costes de producción

A lo largo de las diferentes fases por las que han pasado los sistemas de control de rodada, se ha ido comprobando que entre sus principales beneficios se encuentran la reducción de los costes de producción y de maquinaria, debidos a un menor requerimiento de laboreo (en profundidad y en número de pases), mejora en la eficiencia de tracción y reducción de emisiones. En el caso de Chamen *et al.* (1988), sus primeros resultados llevaron a la conclusión de que con el control de rodada se podía llegar a reducir hasta en un 70% el requerimiento de energía. Tullberg y Murray (1987) basaron su investigación en la evaluación de los efectos del control de rodada en las pérdidas de energía del tractor y los requerimientos de laboreo, concluyendo que el control de rodada reduce los costes de carburante en al menos un 40% además de permitir un rendimiento y capacidad del tractor similar, pero utilizando un 30% menos de potencia. De igual manera Bright y Murray (1990) también llegaron a la conclusión de que el control de rodada disminuye significativamente los requerimientos de carburante del tractor además de mantener el rendimiento de los cultivos.

Algunos datos procedentes de agricultores del norte de Australia indican que la introducción del control de rodada ha supuesto la reducción del 10 al 20% del tiempo de operación en los cultivos extensivos. El trabajo de los vehículos sobre las rodadas permite aumentar la velocidad de trabajo y su estabilidad. Por otro lado, el tiempo disponible para realizar las labores puede aumentar; tras un período de lluvias

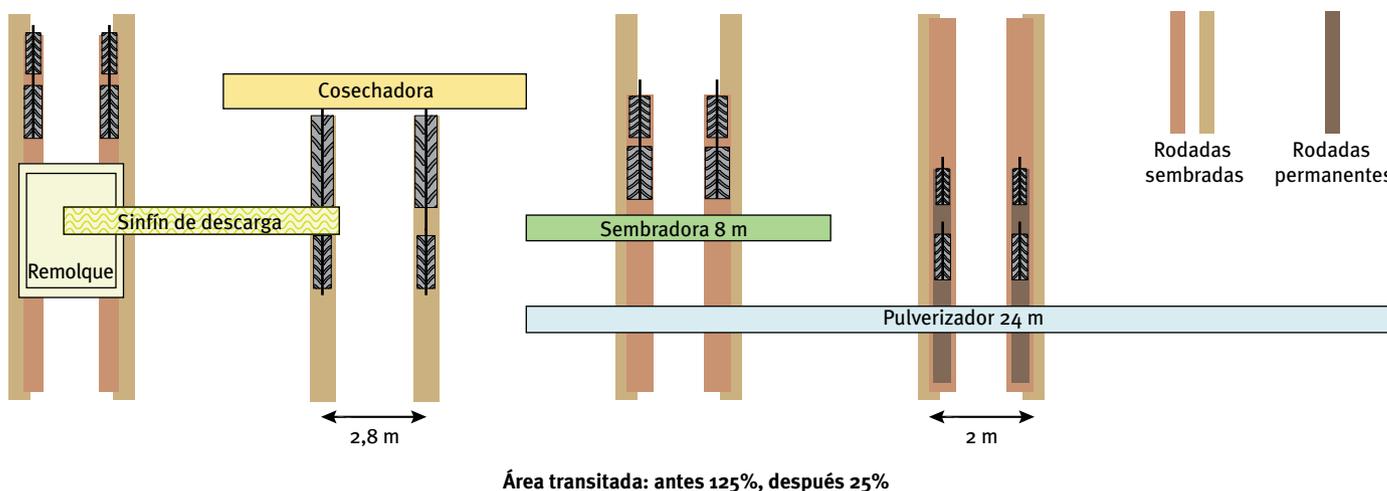
es posible entrar al campo antes si los vehículos transitan sobre las líneas de rodada, por lo que se incrementa el tiempo disponible.

### 2.2.3 La implementación del control de rodadas: desde los “*gantry vehicles*” hasta los RTK

La tecnología disponible para la implementación práctica del control de rodada ha evolucionado mucho desde las primeras iniciativas en los años 50 del siglo pasado. Inicialmente se empleaban vehículos especiales con forma de puente o marquesina dotados de ruedas en los extremos (*gantry vehicles*) similares a los pivots móviles de riego. En los últimos años, Australia es la región donde ha crecido con más fuerza la implantación de los sistemas de control de rodada (más de 2 Mha); sin embargo, en otros países, como Holanda, el interés por esta técnica se ha incrementado con la introducción de las tecnologías de los sistemas de guiado, basados en sistemas de posicionamiento global con cinemática en tiempo real (RTK) (Vermeulen y Mosquera, 2009) y las actuales redes RTK, públicas o privadas.

La adopción de un sistema de control de rodada requiere el estudio detallado de las condiciones de la explotación y del parque de maquinaria disponible. Existen ejemplos de casos en los que este parque se ha adecuado para satisfacer los requerimientos del sistema. En otros, el parque de maquinaria se dimensiona y elige en función de las necesidades del control de rodada. En la Figura 26 se muestra esquemáticamente un ejemplo de adopción de un sistema de control de rodada coincidiendo con el momento de reemplazo de equipos en una explotación de trigo y soja ([www.controlledtrafficfarming.com](http://www.controlledtrafficfarming.com)). La clave del sistema es que todos los tractores y aperos que tengan que entrar en la finca discurren por las mismas huellas (o casi), y que sus anchuras útiles sean iguales o múltiplos de ellas.

**Figura 26. Esquema de las huellas y anchos de vías de las máquinas de una explotación con sistema de control de rodada.**  
 (Fuente: www.controlledtrafficfarming.com)



### 2.2.4 A modo de conclusión

Así pues, si se hace un resumen del concepto de control de rodada se llega a las siguientes conclusiones (Masek *et al.*, 2009; Tullberg *et al.*, 2007): los estudios del control de rodada comienzan con el principal objetivo de evitar la compactación de los suelos de cultivo debida a la introducción de maquinaria pesada. Al comparar los suelos en los que ha habido un laboreo tradicional con los que se ha aplicado el control de rodada se observa (al cabo de varios años) que en estos últimos se mejora la estructura del suelo, debido principalmente a una mayor infiltración del agua y a una menor erosión del terreno (mayor retención de materia orgánica). De igual manera, estudios posteriores han demostrado que no sólo se mejora la compactación del suelo sino que además el control de rodada tiene otros beneficios como la reducción en los costes de carburante, de producción o de maquinaria, así como la reducción de los tiempos de trabajo.

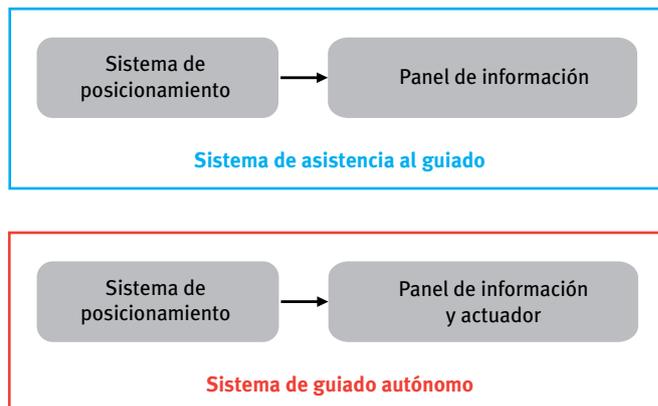


# 3 Ahorro y eficiencia energética derivados de los sistemas de ayuda al guiado de tractores y maquinaria agrícola

## 3.1 Fundamentos de guiado

Un sistema de guiado de un tractor o máquina agrícola, bien sea de asistencia al guiado o de guiado autónomo, es un sistema complejo que podemos considerar se descompone en los bloques de la Figura 27.

**Figura 27. Módulos principales que componen un sistema de asistencia al guiado y un sistema de guiado autónomo**



El bloque principal sobre el que trabaja un sistema de guiado es el sistema de posicionamiento, que proporciona la posición del tractor dentro de la parcela para permitir el guiado a través de la trayectoria deseada.

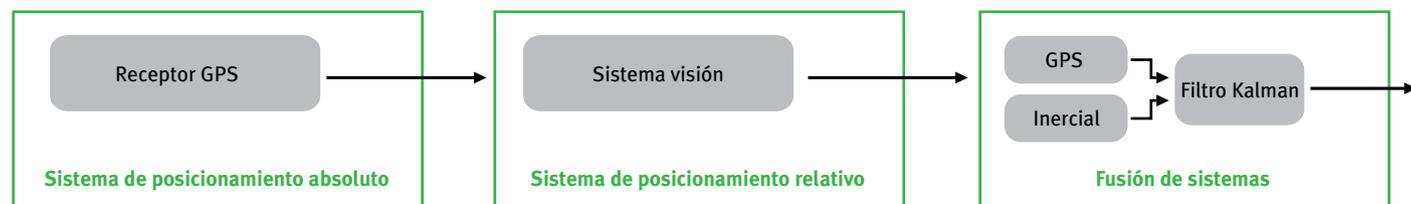
Un sistema de posicionamiento puede ser absoluto, relativo, o una combinación de ambos. Cuando la referencia de posición es con respecto al globo terráqueo, se dice que el sistema de posicionamiento es global. Esto sucede con receptores GPS que posicionan con coordenadas geográficas, con brújulas electrónicas que informan del rumbo, balanceo y cabeceo con respecto al norte magnético, o con balizas activas cuya posición sobre el terreno es conocida. Cuando la posición es con respecto a posiciones anteriores, el sistema de posicionamiento se dice que es relativo. Los odómetros que miden el giro de las ruedas, los sistemas inerciales que ofrecen información sobre los giros o aceleraciones que experimenta el tractor, el potenciómetro u otro sensor de ángulo que informa del ángulo de la dirección, o la información que puede resultar del procesamiento de las imágenes que captura una cámara de vídeo son elementos que se engloban dentro de los sistemas de posicionamiento relativo. Habitualmente, los sistemas de posicionamiento relativos se combinan

con sistemas de posicionamiento absolutos para conseguir un sistema más preciso y robusto. Esta combinación o fusión de sistemas se puede realizar mediante la teoría de los Filtros Kalman.

En la Figura 28 se ofrecen diferentes posibilidades para el posicionamiento de un equipo agrícola, mostrándose en ella tres casos concretos. Muchos sistemas de

guiado actuales emplean únicamente un receptor GPS para el posicionamiento y se corresponden al primer caso. Las cosechadoras que detectan franjas de zona cosechada y sin cosechar corresponden al segundo caso. Los equipos de guiado preciso incorporan sistemas inerciales además del receptor GPS, correspondiendo a la tercera posibilidad de la Figura 28.

**Figura 28. Tres diferentes posibilidades con las que se implementa el posicionamiento en los sistemas de guiado de maquinaria actuales**



Tal y como se muestra en la Figura 27, la diferencia entre un sistema de asistencia al guiado y uno de autoguiado no parece grande. Radica únicamente en que en el autoguiado el sistema controla mecánica o hidráulicamente la dirección, y en la asistencia simplemente se indica al usuario mediante leds o información en una pantalla la dirección a la que tiene que girar el volante para llegar a la dirección deseada. Es decir, en el sistema de asistencia al guiado no hay actuadores que gobiernan la dirección del tractor. Si bien puede parecer una diferencia simple, la precisión en el posicionamiento para el autoguiado debe ser mayor que en la asistencia al guiado para evitar inestabilidades en el guiado. Cuando se trata de posicionamiento GPS, son necesarias correcciones DGPS o RTK para aumentar la precisión, y muchos sistemas además incluyen sistemas inerciales o brújulas electrónicas.

Los equipos de asistencia al guiado destacan por su bajo coste comparados con los de guiado autónomo, y también por su facilidad de implementación en cualquier tractor. Los primeros equipos de asistencia al guiado para tractores que aparecieron en el mercado disponían de una barra de luces formada por diodos led con la que informaban al tractorista de la dirección y magnitud con la que debían girar el volante para seguir por la trayectoria deseada. Estos sistemas se fijan en el cristal delantero del tractor, se les alimenta con

una toma de corriente de 12 voltios, y disponen de una antena receptora GPS que se fija en la parte superior de la cabina del tractor. De entre estos equipos destacan AGROSAT, fabricado por la empresa española GMV Sistemas, Centerline distribuido por la empresa Teejet, y Light Bar de la empresa fabricante de tractores John Deere. La pantalla de estos tres equipos se presenta en la Figura 29.



**Figura 29. Izquierda: Sistema AGROSAT. Centro: Sistema CenterLine. Derecha: Sistema Light Bar de John Deere**

En la actualidad, la mayoría de los equipos de asistencia al guiado disponibles en el mercado disponen de una pantalla a color en la que el agricultor puede ver representado en el terreno la zona tratada y la zona sin tratar, relativa a la posición del tractor. Con respecto a los equipos que disponen de barra de luces, éstos últimos ofrecen grandes ventajas en parcelas irregulares, a la hora de comenzar cualquier pasada, y a la hora de retomar un trabajo de días anteriores. Cualquiera de estos equipos permite medir con precisión áreas y velocidad de avance. Algunos de ellos también permiten abrir y cerrar de forma automática las electroválvulas

del equipo de herbicida durante la aplicación de fitosanitarios dotado de control por tramos. En la Figura 30 se presentan las pantallas de tres de estos equipos, en la que destaca el sistema AGROGUÍA por ser de muy bajo costo y trabajar sobre un ordenador de mano Pocket PC.

Para aplicaciones agrícolas de siembra, recolección o preparación del terreno la precisión conseguida con un sistema de asistencia al guiado no suele ser suficiente, siendo necesario un equipo de guiado autónomo. Los equipos de guiado autónomo disponen de pantallas de información al usuario similares o incluso idénticas a las de los equipos de asistencia al guiado. Pero además disponen de una opción en la que el usuario puede pasar de conducción manual a conducción autónoma. Cuando el equipo de guiado autónomo está diseñado y montado por el fabricante del tractor, el actuador sobre la dirección está integrado dentro del sistema hidrostático de la dirección del tractor. Cuando se trata de un añadido posterior al tractor, en alguna ocasión también se actúa sobre la dirección del tractor modificando el circuito hidráulico y actuando sobre él, pero actualmente se suele optar por algo mucho más simple de instalar, que es actuar sobre el volante del tractor con un motor eléctrico y una conexión mecánica. De esta manera, algunos equipos como Trimble, disponen de un motor eléctrico que transmite el movimiento directamente sobre el volante por medio de un eje con banda de goma que gira (Figura 31 izquierda). La empresa John Deere tiene entre otras opciones de guiado el sistema Auto Track Universal, donde para actuar sobre la dirección se sustituye físicamente el volante que tiene el tractor, por otro que incorpora un motor eléctrico. La empresa TOPCON dispone de un dispositivo muy similar a este de John Deere, al que denomina AES-25 Electric Steering (Figura 31 derecha).



Figura 30. Izquierda: Sistema AGROGUÍA. Centro: Display GreenStar 2600 de John Deere. Derecha: Sistema de guiado Topcon PCS-100



Figura 31. Izquierda: Sistema de autoguiado Ez Steer de Trimble. Derecha: Volante eléctrico AES-25 Electric Steering de la firma TOPCON

El sistema de posicionamiento global GPS es sin duda el método de posicionamiento más empleado en el guiado de vehículos agrícolas. No obstante, también se emplea posicionamiento local para el guiado por medio de sistemas de detección de zonas tratadas mediante láser en máquinas cosechadoras (Figura 32).

Las compañías Claas y New Holland ofrecen sistemas de este tipo desde hace años, pero actualmente el sistema de guiado que más se emplea en este tipo de máquinas es también el guiado basado en GPS. Este tiene 2 ventajas sobre el guiado mediante sensor láser; la primera es que permite realizar pasadas entrelazadas y volver más cómodamente en la cabecera. La segunda es que el receptor GPS se emplea para realizar mapas de rendimiento en las cosechadoras, y empleándolo para el guiado se le dan dos usos. En cuanto a precisión, dependiendo del tipo de receptor y correcciones, puede tener más precisión en el guiado de cosechadoras un sistema basado en GPS que un sistema basado en sensor láser.



Figura 32. Izquierda: Fotografía del sensor Laser Pilot de Claas. Derecha: Imagen representativa de los datos capturados por el sistema Smart Steer de New Holland

### 3.2 Análisis de ahorro y eficiencia energética derivados de los sistemas de ayuda al guiado

Disponer de un sistema de ayuda al guiado permite ciertos tipos de ahorro y beneficios a los agricultores. Todos ellos, de una forma u otra, conducen al ahorro y a la mejora de la eficiencia energética. Estos ahorros pueden estar relacionados con:

- La reducción del consumo de combustible.
- La reducción de insumos.
- La reducción del tiempo de operación.
- La mejora en la calidad de la labor.
- La posibilidad de realizar la labor en el momento idóneo.

A continuación se incluye un estudio en el que se exponen las razones de estos ahorros, y se particularizan para una explotación de 20 parcelas, cada una de ellas de 50 ha y dimensiones de 250 metros de ancho por 2.000 metros de largo. Se supone un único cultivo anual de trigo con producción media de referencia de 5.000 kg/ha. Se toma como valor del precio de venta de cereal 0,15 €/kg. El precio del combustible del tractor se fija en 1 €/l.

Se toma como referencia de los ahorros un sistema de guiado autónomo con precisión centimétrica, en el que son despreciables los solapes o desviaciones de la trayectoria deseada.

#### 3.2.1 Ahorro por la reducción del consumo de combustible

Un sistema de guiado autónomo permite un ahorro de combustible en ciertas labores agrícolas, ya que permite que el tractor realice menos pasadas en cada parcela. Este ahorro de combustible deriva de una disminución de los solapes y de un aumento en el ancho de trabajo.

La cuantificación de este ahorro depende de las labores a realizar en el terreno y de los aperos empleados:

- En una labor de arada, en la que el tractor guía sus ruedas por el surco anterior, no se produce ningún ahorro.
- En una labor de siembra o cosecha se consideran reducciones típicas de solape del 5%.
- En una labor de abonado el tractorista no precisa ver las rodadas de la pasada anterior, y podrá aumentar (o, incluso, hasta duplicar) el ancho de trabajo, siempre que lo admita la uniformidad exigida en la distribución, o con una nueva máquina, ya que las abonadoras son máquinas en las que un ancho de trabajo mayor no requiere mayor potencia o máquinas más complejas. Si un agricultor pasa de abonar con anchos de trabajo de 12 metros a abonar con anchos de 24 metros gracias al guiado GPS, estará reduciendo el número de pasadas en un 50%.

El combustible consumido por el tractor para desplazarse hasta la parcela es independiente de que se empleen o no estas técnicas de guiado. Lo que varía es el combustible que se consume en la parcela. Para realizar una tabla comparativa se va a suponer el ahorro en una parcela rectangular de 50 hectáreas que tiene 2000 metros de largo por 250 metros de ancho. Dependiendo del ancho de trabajo se realizarán más o menos pasadas, según se muestra en la Figura 33. El recorrido real del tractor por la parcela difiere ligeramente del presentado en esta figura, pues se suelen dar pasadas en las cabeceras denominadas “de desorille”, pero la aproximación mostrada en la Figura 33 es válida.

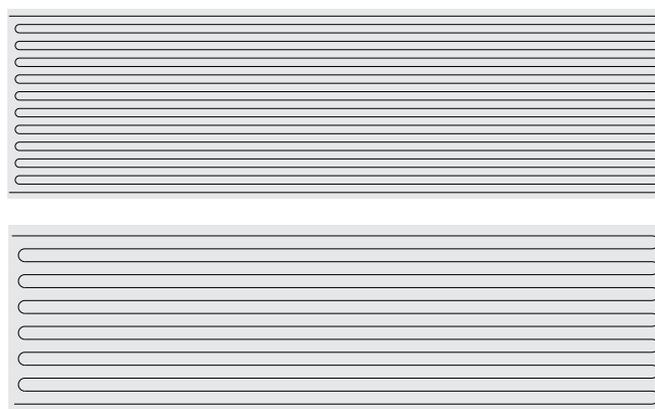


Figura 33. Recorrido que realiza el tractor por la parcela cuando se tiene un ancho de trabajo pequeño (arriba) o grande (abajo).

Se considerará el gasto de combustible para un tractor medio de 180 caballos de potencia y aperos con anchuras adecuados a esta potencia. Se considerarán las diferentes labores para un cultivo de trigo en laboreo convencional en el que se realiza una labor de arado, una de rastra, una de abonado de sementera, una de siembra, una de abonado de cobertera, una aplicación de herbicida y un pase con cosechadora. Con estas premisas se genera la Tabla 7, en la que se muestran los resultados correspondientes al consumo y ahorro de gasóleo dentro de la parcela.

Pero el tractor también consume gasóleo en desplazarse a la parcela, que se debe contabilizar dentro del consumo total de combustible si se quiere estimar el porcentaje total de ahorro de combustible. Para algunas labores como pase de rastra, el tractor sólo necesita desplazarse una vez desde el garaje o almacén a la parcela. Para otras como siembra o abonado serán

necesarios más de un desplazamiento para recargar. Consideramos que a lo largo del cultivo el tractor necesita desplazarse 15 veces hasta la parcela desde el lugar donde se guarda el tractor. Consideramos también que la distancia entre la parcela y el garaje o almacén donde se guarda el tractor es de 5 km. Con estas premisas se pueden generar los datos de la Tabla 6.

**Tabla 6. Datos relativos al consumo de combustible en los desplazamientos del tractor hasta la parcela**

Número de desplazamientos hasta la parcela a lo largo del cultivo	15
Distancia desde la parcela al almacén (km)	5
Distancia total recorrida (km)	150
Velocidad media (km/h)	15
Consumo medio del tractor en desplazamiento (l/h)	20
Consumo total (l)	200

**Tabla 7. Comparativa del trabajo realizado para el laboreo tradicional de una parcela de trigo de 50 hectáreas, con y sin sistema de guiado GPS**

	Arado	Rastra	Abonado sementera	Siembra	Abonado cobertera	Herbicida	Cosecha	Total labores
Ancho de trabajo del apero (m)	2	6	entre 12 y 24 metros	6	entre 12 y 24 metros	18	6	
Solape típico del ancho de trabajo (%)	0	5	0	5	0	6	10	
Ancho de trabajo efectivo sin guiado (m)	2	5,7	12	5,7	12	16,92	5,4	
Ancho de trabajo efectivo con guiado (m)	2	6	24	6	24	18	6	
Número de pasadas sin guiado	125	44	21	44	21	15	47	317
Número de pasadas con guiado	125	42	11	42	11	14	42	287
Longitud recorrida sin guiado (km)	250	88	42	88	42	30	92	632
Longitud recorrida con guiado (km)	250	84	22	84	22	28	84	494
Velocidad media (km/h)	8	12	11	12	11	6	4	
Tiempo de trabajo sin guiado (h)	31,25	7,33	3,81	7,33	3,81	5	23	81,5
Tiempo de trabajo con guiado (h)	31,25	7	2	7	2	4,66	21	74,9
Ahorro de tiempo (h)	0	0,33	1,80	0,33	1,81	0,33	2	6,54
Consumo medio (l/h)	28	25	25	25	25	22	24	
Consumo total sin guiado (l)	875	183,25	95,25	183,25	95,25	110	552	2.094
Consumo total con guiado (l)	875	175	50	175	50	102,52	504	1771
Ahorro de combustible (l)	0	8,25	45,25	8,25	45,25	7,48	48	323
Ahorro para un coste de 1 euro/litro (€)	0	8,25	45,25	8,25	45,25	7,48	48	323

Para finalizar, suponemos que el agricultor cultiva 1.000 ha y que están repartidas en 20 parcelas como la considerada anteriormente. Tendríamos finalmente la Tabla 8.

**Tabla 8. Datos del ahorro en combustible conseguidos dentro de una explotación gracias al empleo de un sistema de guiado autónomo**

	Parcela 50 ha	Explotación de 1.000 ha
Consumo de combustible en desplazamientos (l)	200	4.000
Consumo dentro de la parcela sin guiado (l)	2.094	41.880
Consumo dentro de la parcela con guiado (l)	1.771	35.420
Consumo total de combustible sin guiado (l)	2.294	45.880
Consumo total del combustible con guiado (l)	1.971	39.420
Ahorro de combustible relativo al guiado (l)	323	6.460
Ahorro de combustible relativo al guiado (%)	7,1%	7,1%
Ahorro para un coste de 1 euro/litro (€)	323	6.460

### 3.2.2 Ahorro de insumos

Un guiado preciso ahorra insumos. Es este apartado vamos a estimar estos ahorros.

Por una parte vamos a suponer que con un guiado manual el tractor siembra produciendo un pequeño solape para así asegurarse de no dejar ninguna pequeña franja sin sembrar. Suponemos que la zona solapada tiene doble dosis de simiente.

Por otra parte, en el abonado, un pequeño solape únicamente implica una mayor dosis de fertilizante repartida no en una franja, sino en una zona amplia. Y una separación un poco mayor implica una dosis más pequeña pero también repartida en una amplia zona. En cualquiera de los dos casos, todo el fertilizante en la parcela se aprovechará adecuadamente, y se considera que no hay ahorro de insumos en el abonado.

Para finalizar, en la aplicación de herbicidas ocurre lo mismo que en la siembra, y es que el agricultor de media solapa una pequeña franja para no dejar franjas sin tratar. El coste del producto fitosanitario en un cultivo de trigo es muy variable de unos herbicidas a otros, ya que el producto puede costar entre 6 y 50 euros por hectárea, dependiendo de que se trate de herbicidas para hierbas de hoja ancha o específicos para gramíneas. En este estudio supondremos un coste medio de producto herbicida de 30 €/ha. También se considera un coste de simiente de 0,25 €/kg y que se siembra con dosis de 200 kg/ha. Se obtienen los datos de la Tabla 9, en la que en la última fila se presentan los ahorros de insumos que se pueden conseguir con un guiado preciso.

**Tabla 9. Datos del ahorro en insumos conseguidos dentro de una explotación gracias al empleo de un sistema de guiado autónomo**

	Parcela 50 ha	Explotación de 1000 ha
Ancho de trabajo solapado en siembra (%)	5	5
Ancho de trabajo solapado en herbicida (%)	6	6
Número de pasadas sin guiado en siembra	44	880
Número de pasadas sin guiado en aplicación de herbicida	15	300
Longitud recorrida sin guiado en siembra (km)	88	1.760
Longitud recorrida sin guiado en aplicación de herbicida (km)	30	600
Área solapada sin guiado en siembra (ha)	2,6	52
Área solapada sin guiado en aplicación de herbicida (km)	3,2	64
Cantidad de simiente malgastada (kg)	528	10.560
Cuántía malgastada en simiente para un coste de 0,25 €/kg (€)	132	2.640
Cuántía malgastado en fitosanitarios para un coste de aplicación de 30 €/ha (€)	97	1940
Cuántía malgastada en insumos (siembra más herbicidas) (€)	229	4.580

### 3.2.3 Ahorro en tiempo de operación

Un guiado autónomo ahorra tiempo, tal y como se ha visto en la Tabla 1 y ello incide en los siguientes conceptos de ahorro económico:

- El del operario que trabaja en el tractor.
- El de la máquina que tiene una vida útil determinada.
- El de las piezas de la máquina que se gastan y hay que reponer.
- El asociado a averías de la maquinaria.

**Tabla 10. Datos del ahorro en una parcela de 50 hectáreas asociado al ahorro de tiempo que conlleva el empleo de un sistema de guiado autónomo**

	Arado	Rastra	Abonado sementera	Siembra	Abonado cobertera	Herbicida	Cosecha	Total labores
Ahorro de tiempo (h)	0	0,33	1,80	0,33	1,80	0,33	2	7
Consumo medio (l/h)	28	25	25	25	25	22	24	
Coste medio de la labor por hora por una empresa de trabajos a terceros (€)	72	64	55	75	60	60	100	
Coste de la labor por hora sin considerar el combustible (€)	44	39	30	50	35	38	76	
Ahorro asociado al tiempo (€)	0	12,87	54	16,50	63	12,54	152	310

**Tabla 11. Datos del ahorro en una explotación asociados al ahorro de tiempo que conlleva el empleo de un sistema de guiado autónomo**

	Parcela 50 ha	Explotación de 1.000 ha
Ahorro asociado al ahorro de tiempo (€)	310	6.200

### 3.2.4 Ahorros asociados a una mejora de la calidad de la labor

Un sistema de ayuda al guiado posibilita beneficios no considerados en apartados anteriores. De entre ellos, se tienen en cuenta en este estudio los asociados a la siembra y a la aplicación de herbicidas.

Cuando se siembra o aplican herbicidas solapando una pequeña franja, no sólo se desperdician insu-

Se valoran en este estudio estos gastos suponiendo que son los que cobra un agricultor o empresa de trabajos a terceros por realizar esa labor, pero descontando el coste de combustible por estar ya éste contabilizado en un apartado anterior. Lo hacemos con la parcela de 50 hectáreas de dimensiones ya mencionados, y partiendo de los datos de la Tabla 7, se obtienen los datos de la Tabla 10. Extrapolando estos datos a una explotación de 1.000 hectáreas se obtienen los datos de la Tabla 11.

mos, sino que es perjudicial para el cultivo una dosis doble de simiente o de herbicida. Consideramos un beneficio del sistema de asistencia al guiado el hecho de que no se perjudiquen los cultivos por este solape. Con datos de tablas anteriores y estimaciones de beneficio por superficie proporcionadas por un agricultor experimentado, se genera la Tabla 12. Se ha considerado una producción de 5.000 kg/ha, un precio del trigo de 0,15 €/kg y una disminución de producción por solape en siembra del 10%. La disminución de producción por solape en herbicida depende del tipo de herbicida a emplear. En algunos puede llegar incluso al 50%, mientras que en otros apenas tiene efecto una dosis doble de herbicida sobre el cultivo del trigo. Para este estudio consideramos un 30%. Extrapolando estos datos a una explotación de 1.000 hectáreas se obtienen los datos de la Tabla 13.

**Tabla 12. Datos relativos a los beneficios asociados a un mejor laboreo para una parcela de 50 ha**

	Siembra	Herbicida	Total
Ancho de trabajo solapado de media (%)	5	6	
Área solapada sin guiado (ha)	2,6	3,2	
Pérdidas por solape en la producción (%)	10	30	
Pérdidas por solape en la producción en la zona de solapes (kg)	1.300	4.800	6.100
Pérdidas por solape en la producción en la zona de solapes suponiendo precio de venta de 0,15 €/kg (€)	195	720	915

**Tabla 13. Datos del ahorro asociado a un mejor laboreo**

	Parcela 50 ha	Explotación de 1.000 ha
Ahorro asociado un mejor laboreo (€)	915	18.300

### 3.2.5 Ahorro asociado a la posibilidad de realizar la labor en el momento idóneo

El coste de oportunidad designa el valor de la mejor opción no realizada.

El ahorro asociado al laboreo en el momento idóneo, aunque es el último en orden de presentación, seguramente es el que haga decidirse a un número mayor de agricultores a la adopción de tecnologías de guiado.

En la agricultura es muy importante la realización de las labores en el momento adecuado. Realizar las tareas fuera de tiempo reduce el rendimiento económico que obtiene el agricultor.

Para ver este hecho, supongamos un caso de ejemplo en el que dos agricultores cargan a última hora de la tarde de un día sendas abonadoras con 10.000 kg de fertilizante, para abonar 20 ha. Puede ocurrir que el primer agricultor, gracias a disponer de un sistema de guiado, aplique el fertilizante por la noche

ante una previsión inminente de lluvia, y el segundo agricultor, que no lo posee, tenga que dejarlo para el día siguiente. Si al día siguiente comienza a llover y no cesa en una semana, el segundo agricultor tendrá que demorar la aplicación con las consiguientes pérdidas en la producción. Ambos tienen los mismos gastos, pero el agricultor que no aplicó el fertilizante en el momento idóneo tuvo una disminución de producción del 20%, que sobre 20 hectáreas, a una producción de 5.000 kg/ha, y con un coste de cereal de 0,15 €/kg, suponen una diferencia en los beneficios de  $5.000 \times 20 \times 0,2 \times 0,15 = 3.000$  € en esas 20 ha.

Un sistema de guiado permite trabajar por la noche y ahorrar tiempo, con lo que facilitará a los agricultores la realización de sus labores en el momento adecuado. El ahorro asociado al laboreo en el momento idóneo es un valor muy variable, dependerá de cada explotación e incluso en una misma explotación dependerá del año. En este estudio lo estimamos como el 2% de la producción total en kg, y obtenemos los resultados de la Tabla 14.

**Tabla 14. Datos relativos a los beneficios asociados al laboreo en el momento idóneo**

	Parcela 50 ha	Explotación de 1.000 ha
Producción total suponiendo producción media de 5.000 kg/ha (kg)	250.000	5.000.000
Producción total suponiendo un precio de venta de 0,15 €/kg (€)	37.500	750.000
Ahorro asociado al laboreo en el momento idóneo (€)	750	15.000

### 3.2.6 Valoración total de los ahorros asociados a un guiado preciso para la situación propuesta y conclusiones

Con los datos de los apartados anteriores podemos confeccionar la Tabla 15, en la que se presentan cada uno y el total de los ahorros en una campaña de trigo para la situación propuesta en el estudio.

**Tabla 15. Valoración total de los ahorros asociados a un guiado preciso a lo largo de la campaña**

	Parcela 50 ha	Explotación de 1.000 ha
Ahorro de combustible (€)	323	6.460
Ahorro de insumos (€)	229	4.580
Ahorro de tiempo (€)	310	6.200
Ahorros asociados a un mejor laboreo (€)	915	18.300
Ahorros asociados al laboreo en el momento idóneo (€)	750	15.000
Total de los ahorros asociados a un guiado preciso (€)	2.527	50.540

El coste de la instalación de un equipo de guiado autónomo oscila entre los 6.000 y 3.000 € dependiendo del modelo y de su precisión. Se pueden encontrar equipos de asistencia al guiado a partir de 1.000 €. Teniendo en cuenta estos costes y los ahorros antes calculados, un equipo de guiado autónomo no sólo se amortiza en una campaña sino que ofrece en esa campaña beneficios cuando la explotación es grande. Si la explotación es mediana tardará en amortizarse varias campañas. Cuando la explotación es pequeña, se puede optar por adquirir un sistema de asistencia al guiado para labores de abonado y aplicación de herbicidas, que si bien no conllevará todos los ahorros aquí calculados, con toda seguridad se amortizará en poco tiempo.



## 4 Ahorro y eficiencia energética derivados de nuevas tecnologías de siembra

---

Cuando se habla de siembra usando técnicas de agricultura de precisión, es frecuente pensar en primer lugar en tecnologías de dosificación variable. En tal caso el ahorro de insumos vendrá, lógicamente, por la vía de una reducción en la cantidad de semillas empleada, al ajustar la densidad superficial del cultivo (plantas/ha) a los valores óptimos en cada zona de la parcela, o a otros inputs (agua, fertilizante, etc.). Las consideraciones a realizar en caso de usar dosificación variable de semilla son muy similares a las indicadas para abono o fitosanitarios en otras partes de este documento. De hecho, los mecanismos de dosificación electrónica son muy similares a los de, por ejemplo, una abonadora neumática. Sin embargo, hay otra aplicación de las tecnologías de AP que incide mucho más directamente en el ahorro energético.

### 4.1 La siembra directa con agricultura de precisión

La siembra directa es la operación de implantación de cultivo en la que las prácticas de agricultura de precisión pueden mejorar significativamente la eficiencia energética y los resultados de nascencia, comparado con su aplicación a una siembra convencional. En los sistemas de siembra directa (Figura 34) la variabilidad en la resistencia del terreno y en los residuos del cultivo anterior amplifican las dificultades en el establecimiento de la semilla y la nascencia, con consecuencias a veces dramáticas en la productividad superficial.



Figura 34. Equipo de siembra directa trabajando

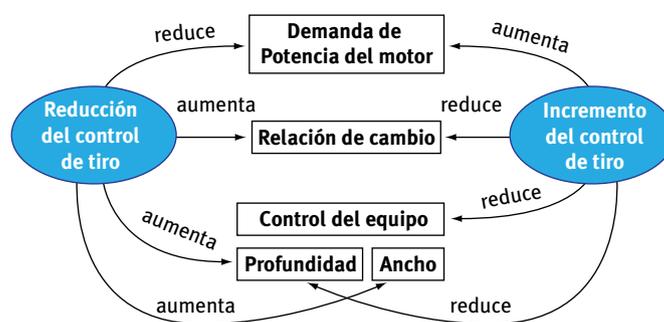
La clave radica en emplear sistemas de control pasivo y/o activo de la profundidad que permitan ajustar la fuerza normal de la reja o los discos contra el suelo durante la siembra, consiguiendo por una parte limitar el esfuerzo de tiro (limitando el consumo), y aumentando la velocidad de operación (capacidad de trabajo, ha/h). Por otra parte los sistemas de control activo permiten mejorar la uniformidad en la profundidad de siembra adaptándose al perfil de terreno y solventando las diferencias en residuo vegetal a lo largo de la parcela.

La Figura 35 resume la relación existente entre la potencia del motor, la relación de transmisión de la caja de cambios, y la profundidad de trabajo del implemento. Cuando se emplea control activo, dado que son tres los parámetros de control (potencia, relación de cambio y profundidad) resulta imperativo el empleo de sistemas de control jerárquico de manera que sea posible la coordinación de los distintos subsistemas, que en ocasiones compiten de forma antagónica (menor consumo contra mayor profundidad).

La Figura 36 representa tres ejes para la evaluación de la operación de siembra: el requerimiento de potencia, la correcta y uniforme consecución de la profun-

dididad (calidad de la labor) y la capacidad de trabajo. En la actualidad (izquierda de la figura) las máquinas de siembra directa tienden a asegurar la calidad de la labor dotando al apero de un elevado peso, con lo que aumenta la potencia requerida. Los sistemas de control activo (derecha) tenderán a limitar los requerimientos de potencia, ajustando los esfuerzos para alcanzar de forma uniforme la profundidad, maximizando la capacidad de trabajo en términos de velocidad de avance, siempre que su velocidad de respuesta sea suficientemente elevada.

**Figura 35. Resumen del efecto del control de tiro en distintos parámetros de funcionamiento del conjunto tractor-sembradora de siembra directa.** (Fuente: Adaptado de Scarlett, 2001)



**Figura 36. Los tres ejes de interés en el control de aperos de labranza y por extensión al caso de siembra directa. Izquierda: situación en una siembra directa convencional; derecha: con control activo de profundidad.** (Fuente Adaptado de Scarlett, 2001)

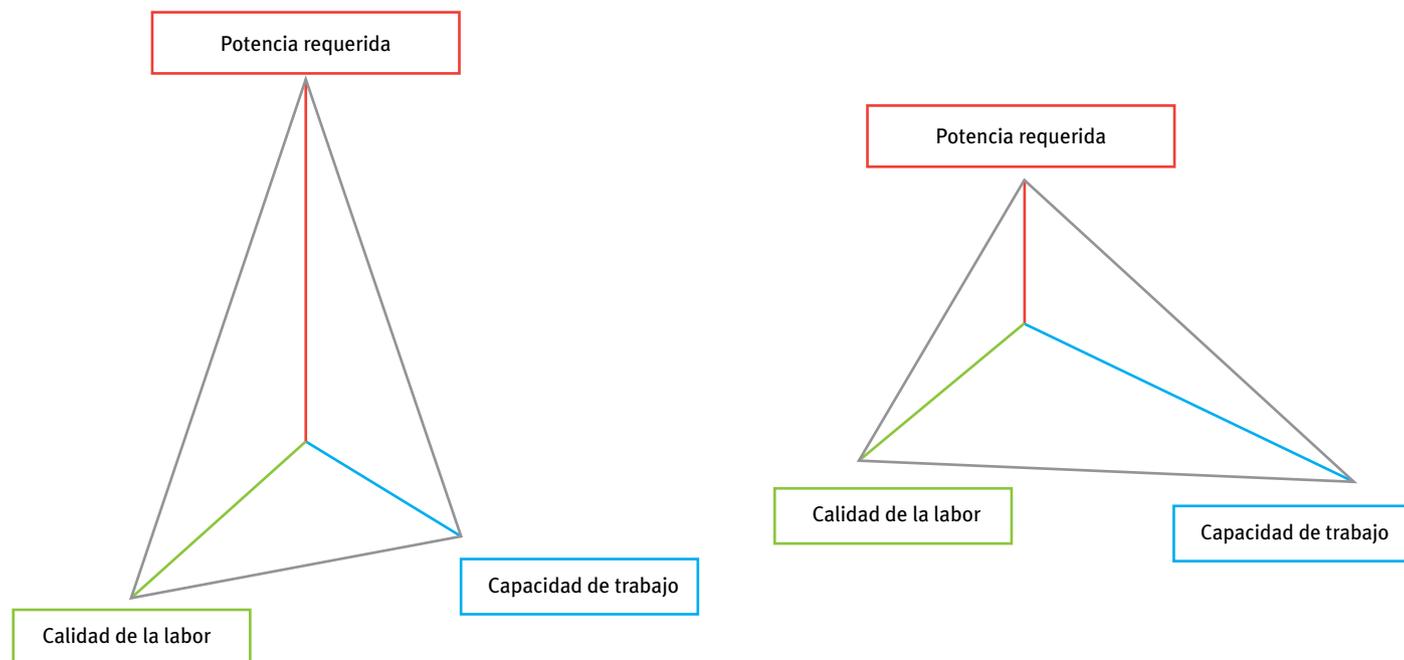


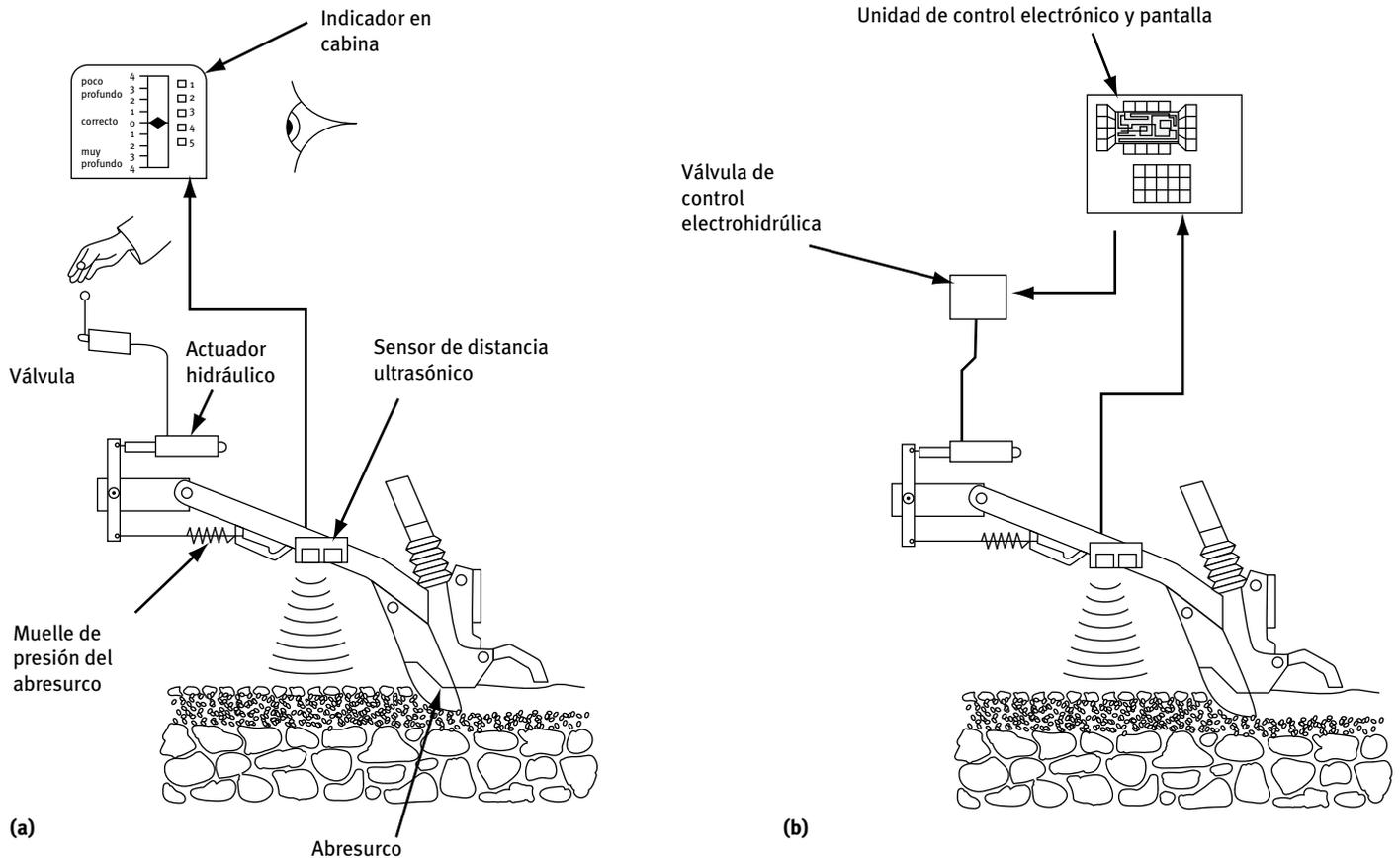


Figura 37. Monitor X20 en operación de guiado-siembra (Topcon)



Figura 38. Terminal virtual ISOBUS de última generación, que incluye doble pantalla para poder mostrar los controles de dos implementos a la vez (sembradora y tractor, por ejemplo) (Kverneland)

**Figura 39. Es frecuente ver implementados sensores de ultrasonidos en sembradoras para controlar la profundidad del cuerpo de siembra.** (Fuente: Scarlett, 2001, reproducido de Auerhammer 1989)



Los primeros sensores propuestos en la literatura para determinar la profundidad de trabajo instantánea fueron del tipo de ultrasonidos (Figura 39). En la actualidad, es posible además incluir una batería de sensores tales como bulones de carga, células de carga en los resortes de control de profundidad, y LVDTs o transductores inductivos para establecer el desplazamiento

angular o vertical del cuerpo de siembra, algunos de ellos comercializados en sistemas de control comerciales (por ejemplo, Topcon X20, Figura 37). Por otra parte, puede resultar del máximo interés emplear células fotoeléctricas para el conteo y cuantificación del flujo de semillas. Existen ya en la actualidad sembradoras monograno con sensores ópticos de este tipo, pero

son “únicamente” empleados por ahora para controlar los posible fallos del dosificador (alveolos vacíos, Figura 40). Toda esta información, combinada con los sistemas de georreferenciación, permite establecer distintos mapas o capas de información a incluir en un SIG.

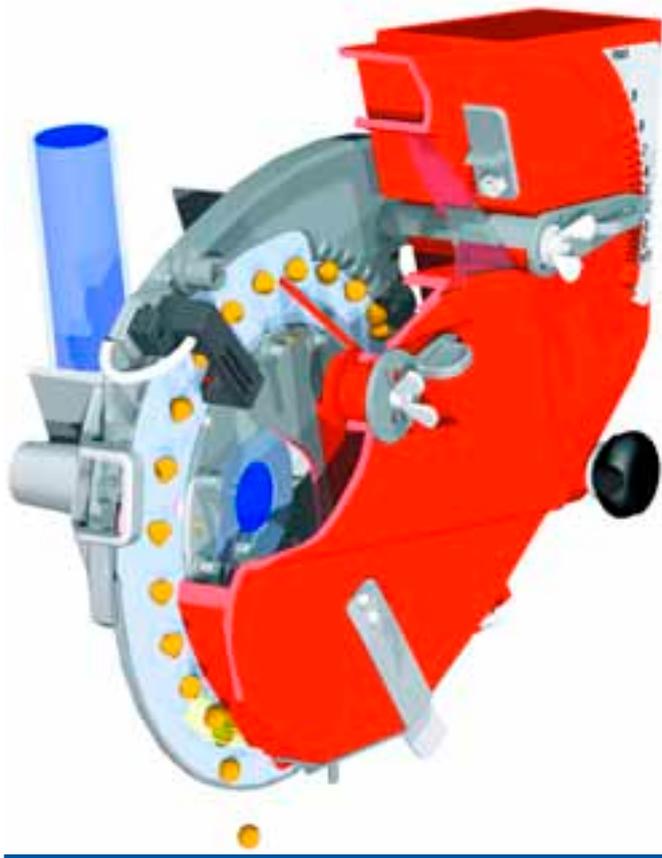


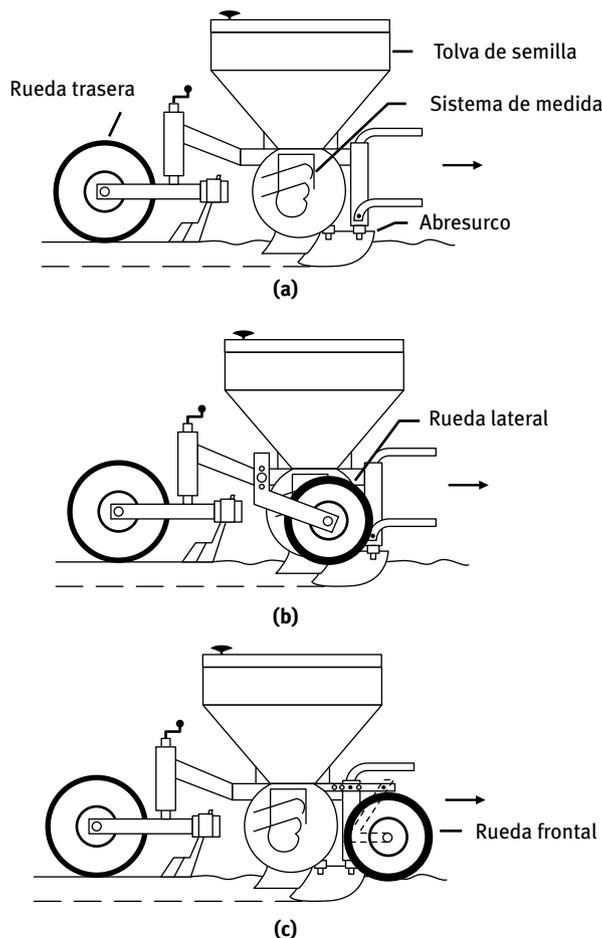
Figura 40. Ciertas sembradoras monograno ya incorporan un sensor óptico (pieza negra rectangular) para el conteo de semillas durante la siembra (Kverneland Accord)

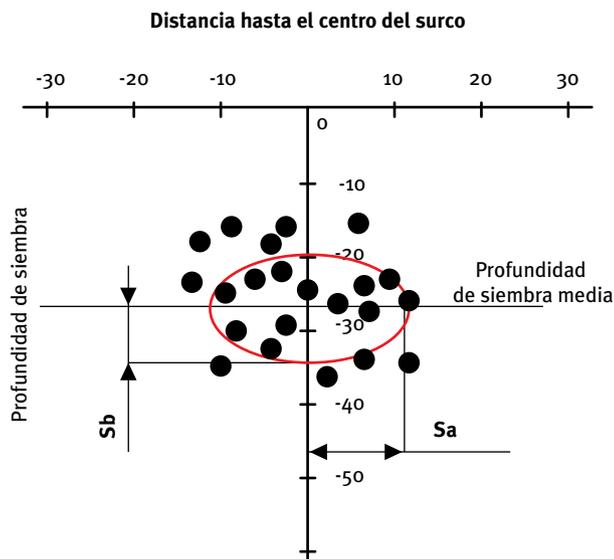
La calidad de la siembra se debe establecer en términos de la distribución horizontal y vertical de semillas, y del porcentaje de nascencia. Existen muy pocos artículos que analicen de forma sistemática los efectos de los sistemas de control pasivo y activo respecto a estos parámetros. Los artículos más interesantes a este respecto son de los años 2008 y 2009. El primero, realizado por dos investigadores de la Universidad de Akdeniz en Turquía, aborda el efecto del control pasivo con tres procedimientos distintos de control de profundidad: rueda delantera, rueda trasera y lateral, y dos procedimientos de apertura de disco: reja y doble disco. De acuerdo con este estudio, la variabilidad de la profundidad de siembra

se vio especialmente acentuada en el caso de apertura de surco con doble disco. La menor variabilidad en la profundidad de siembra en los cultivos ensayados (maíz y sandía) se obtuvo en todos los casos con el sistema de control lateral que asimismo fue el que más se aproximó en valor medio a la profundidad de consigna. La Tabla 16, elaborada a partir de los datos de Karayael y Ozmerzi resume los resultados en nascencia, así como en variabilidad de la distribución superficial y en profundidad de la semilla (Figura 41, gráfico de página siguiente). Este estudio indica además que los sistemas de control de profundidad con ruedas laterales son los menos sensibles a variaciones en los residuos vegetales del suelo aunque es necesaria mayor presión vertical para conseguir la correcta penetración del implemento.

**Figura 41. Esquema de los tres sistemas de control activo estudiados (rueda trasera, lateral y frontal) y resultados de la precisión conseguida (desviación lateral y en profundidad, respecto al centro de la línea).**

(Fuente: Karayael y Ozmerzi, 2008. Universidad de Akediz, Turquía)





En 2009 se han publicado dos trabajos relativos al control de profundidad en sembradoras de siembra directa. El primero (Canacki, Karayel *et al.*, 2009) llevado a cabo por el mismo equipo de investigación que en el artículo anterior, compara la calidad del trabajo de siembra directa en maíz, algodón y soja, para distintas condiciones de humedad (3,5% contra 18,7%), y de

rastraje en el suelo (1.320 kg/ha contra 2.230 kg/ha), y empleando en ambos casos elementos de apertura del surco de doble disco. En este estudio se menciona la ventaja comparativa que supone poder efectuar la siembra directa en condiciones de elevada sequedad del suelo aunque se reconoce que pueden producirse situaciones críticas que limiten la nascencia. Algunos de los resultados más relevantes indican que en condiciones de mayor humedad las semillas tardaron más en nacer, en gran medida debido a que la profundidad de siembra se vio incrementada a pesar de establecer la misma regulación de la sembradora que para condiciones de suelo seco. Por otra parte la cantidad de residuo no afectó significativamente al nivel de nascencia. Parece claro que cualquier sistema de agricultura de precisión para la supervisión en tiempo real de la uniformidad de la siembra constituirá una herramienta de gran valor que podrá emplearse como sistema simplemente de diagnóstico con control manual de la profundidad, o con un sistema de control activo (ver Figura 39).

**Tabla 16. Resultados en nascencia en un ensayo de tres procedimientos de control pasivo de profundidad de siembra. El empleo de sensores en tiempo real puede permitir la realización de estudios sistemáticos sobre la calidad de la siembra directa realizada.** (Fuente: Karayel y Ozmerzi, 2008. Universidad de Akediz, Turquía)

Componente del control de profundidad empleado:	Porcentaje de emergencia (%)							
	Coeficiente de variación en profundidad de siembra (%)							
	Maíz				Sandía			
	Campo 1		Campo 2		Campo 1		Campo 2	
	Reja	Doble disco	Reja	Doble disco	Reja	Doble disco	Reja	Doble disco
Rueda trasera	86,7 <b>6,0a</b>	84,3 <b>7,8a</b>	90,3 <b>7,5a</b>	89,7 <b>11,8a</b>	74,3b <b>11,9a</b>	74,4b <b>13,1a</b>	79,0b <b>10,3a</b>	78,6b <b>10,9a</b>
Rueda delantera	86,9 <b>5,9a</b>	85,1 <b>7,8a</b>	90,5 <b>7,4a</b>	89,2 <b>11,5a</b>	74,1b <b>11,3a</b>	75,0b <b>12,8a</b>	78,8b <b>9,9a</b>	78,7b <b>10,4a</b>
Rueda lateral	87,3 <b>5,9b</b>	85,4 <b>6,6b</b>	91,0 <b>6,3b</b>	89,0 <b>10,2b</b>	76,7a <b>9,8b</b>	77,7a <b>10,9b</b>	86,7a <b>7,1b</b>	80,1a <b>8,6b</b>

Nota: la letra que acompaña a los números indica grupos con variaciones estadísticamente grandes.

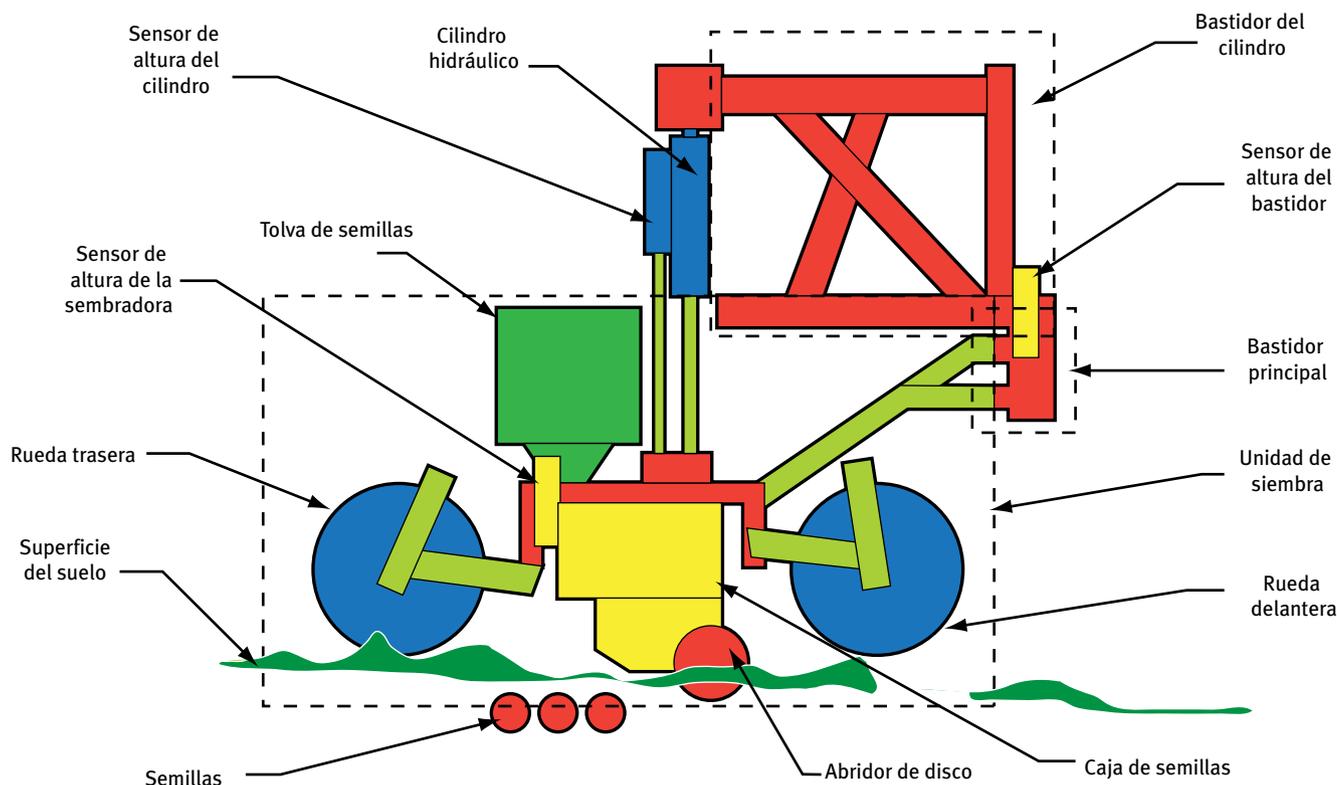
El control activo de la profundidad en equipos de siembra directa ha sido abordado muy recientemente en un trabajo de 2009 (Burce, Kataoka *et al.*, 2009). Este estudio presentado en la reunión anual de ASABE ha sido llevado a cabo por varios investigadores de la Facultad

de Agronomía de Hokkaido. En este estudio se compara la siembra convencional y la siembra directa empleando un dispositivo hidráulico que permite efectuar un control activo de la profundidad de siembra (Figura 42). A la vista de los resultados de este estudio (Tabla 17),

el control activo resulta muy efectivo tanto en siembra convencional como siembra directa, aunque la mejoría se duplica en siembra directa respecto a siembra convencional. Por tanto, el uso de sembradoras equipadas con estos sistemas supone, no sólo un ahorro de combustible, sino además una mejor nascencia.

En la medida en que el número de sensores y de actuadores se incrementa, resulta imprescindible emplear un diseño eficiente de la configuración electrónica. En este sentido existen en el mercado sistemas de control adaptados a sembradoras con o sin comunicación ISOBUS (Figura 38).

**Figura 42. Equipo empleado para siembra directa con control activo de profundidad en ensayos de remolacha**  
(Burce, Kataoka et al. 2009)



**Tabla 17. Porcentaje de nascencia en distintos ensayos con control activo de profundidad: siembra convencional contra siembra directa y suelo escasamente compactado contra suelo muy compacto. Una nascencia del 102% sólo puede ser atribuida al procedimiento de cómputo basada en el número de plantas esperado para una distancia teórica de siembra.**  
(Fuente: Burce, Kataoka et al. 2009)

Nº de plantas emergidas:	Laboreo convencional (suelo normal)		No laboreo (suelo medio)		No laboreo (suelo duro)	
	Sin control de profundidad	Con control activo	Sin control de profundidad	Con control activo	Sin control de profundidad	Con control activo
Media	87	97	77	99	82	102

## 4.2 Conclusiones

La siembra es una operación costosa en términos de insumos, estando su éxito supeditado a un correcto y uniforme control de la profundidad de siembra y de la colocación espacial de las semillas.

La siembra directa es una técnica especialmente sensible a la correcta regulación y a las variaciones espaciales en compactación, humedad y residuo vegetal sobre el terreno.

La agricultura de precisión proporciona técnicas de diagnóstico de la calidad de siembra en tiempo real en los sistemas de control pasivo.

La incorporación de sistemas de control activo de profundidad puede mejorar enormemente la nascencia del cultivo a la vez que limita la fuerza de tracción requerida.

Conviene destacar en este capítulo que, en la medida que los sistemas de control activo se impongan en la siembra directa, resultará imprescindible implementar sistemas de control de fallos de los sensores y de los actuadores. De no ser así, estas nuevas máquinas dotadas de electrónica compleja podrían ser poco fiables en condiciones de campo.



## 5 Ahorro y eficiencia energética derivados de nuevas tecnologías de control localizado de malas hierbas

### 5.1 Introducción

Por lo general, las malas hierbas se presentan de manera heterogénea en los campos cultivados, distribuyéndose en rodales de densidad variable y forma diferente (Cardina *et al.*, 1997). Este hecho se pone especialmente de manifiesto en las especies perennes, las cuales forman rodales bien definidos y estables en el tiempo (Figura 43 a) como consecuencia de su sistema de reproducción vegetativa, lo que facilita su manejo localizado. Aunque las especies anuales pueden presentarse de forma más aleatoria debido a su capacidad de dispersión por semillas, suelen también agregarse en rodales relativamente compactos (Figura 43 b).



Figura 43. a) Rodales de *Sorghum halepense* (especie perenne) en cultivo de maíz; b) Rodales de *Amsinckia lycopsooides* (especie anual) en cultivo de cebada

Como ya se ha indicado en anteriores capítulos, la agricultura de precisión pretende el ajuste de insumos a las necesidades reales del cultivo. De esta forma, el manejo localizado de malas hierbas permite reducir substancialmente las cantidades de herbicidas empleadas para el control de estas infestantes. El manejo localizado de malas hierbas puede realizarse según las estrategias siguientes: 1) aplicar herbicidas tan solo en aquellas zonas en las que las poblaciones de malas hierbas superan un cierto umbral; 2) ajustar la dosis de herbicida a la densidad de la población presente en cada zona, utilizando

dosis completa (la recomendada en la etiqueta del producto) en los rodales y dosis reducida en el resto del campo; y 3) realizar tratamientos diferenciados similares a los indicados previamente pero utilizando métodos mecánicos o térmicos.

## 5.2 Detección de las malas hierbas

Un proceso clave y necesario para manejar de forma localizada las poblaciones de malas hierbas es conocer su ubicación dentro del campo. Para ello, se necesita en primer lugar reconocer la especie vegetal y en segundo lugar posicionarla en el espacio. Este reconocimiento o detección de las poblaciones arvenses en los campos de cultivo se puede hacer de diversas formas; la más sencilla consiste en detectar las malas hierbas de forma visual, realizando esta operación desde vehículos agrícolas durante la ejecución de ciertas operaciones de cultivo, como el abonado o la recolección. También se puede llevar a cabo una detección automática desde vehículos terrestres, existiendo dos tipos en función del sistema empleado en la discriminación de las malas hierbas: i) sistemas que utilizan la espectroscopia para distinguir el suelo y la vegetación verde en base a las diferencias en su reflectividad (Figura 44), válidos para cultivos entre líneas o áreas no cultivadas (Andújar *et al.*, 2009); y ii) sistemas basados en el uso de imágenes de video, las cuales necesitan ser procesadas con un ordenador para diferenciar el cultivo de las malas hierbas (Gerhards *et al.*, 2006), teniendo estos sistemas la posibilidad de distinguir grupos de especies vegetales, por ejemplo gramíneas y dicotiledóneas (Figura 45).

En la actualidad, la mayoría de los estudios sobre detección de malas hierbas se encaminan hacia los métodos automáticos, por presentar un futuro más prometedor en lo que a reducción de costes se refiere. Por otro lado, la teledetección desde plataformas aerotransportadas es una gran esperanza en este campo, aunque aun ha de resolver algunos inconvenientes relacionados con la escasa flexibilidad en el momento de adquisición de imágenes (aéreas y satelitales), además de la incapacidad de detectar

densidades bajas de malas hierbas debido a su menor resolución (Lamb & Brown, 2001) (Figura 46).



Figura 44. Sistema de mapeo basado en sensores optoelectrónicos (Andújar *et al.*, 2009)



Figura 45. Cámara biespectral (Gerhards *et al.*, 2006)

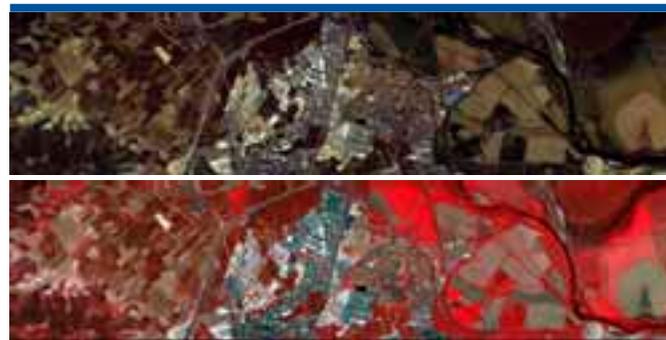


Figura 46. Imágenes en el espectro visible e infrarrojo procedentes del satélite QuickBird (Martín *et al.*, 2010)

### 5.3 Aplicación de tratamientos localizados contra las malas hierbas

La detección de las malas hierbas es el primer paso, pero aún queda un largo camino hasta conseguir su control. El siguiente paso sería utilizar esta información para aplicar los tratamientos herbicidas de forma localizada sobre los rodales detectados, evitando el gasto innecesario de pulverizar zonas libres de infestación.

En agricultura de precisión, este manejo localizado puede realizarse desde dos enfoques claramente diferenciados según el “tiempo” transcurrido entre la detección y la aplicación:

- i) Tratamientos en base a mapas de malas hierbas, que implican un tiempo de procesamiento de los datos en la oficina; y
- ii) Tratamientos en tiempo real, realizando la aplicación en una operación conjunta inmediatamente después de la detección.

Ambos enfoques presentan ventajas y desventajas, como veremos a continuación.

#### 5.3.1 Tratamientos basados en mapas adquiridos con anterioridad

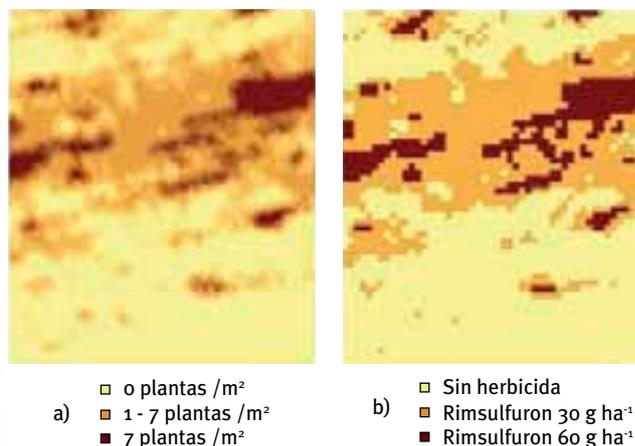
La creación y utilización de mapas de malas hierbas adquiridos con anterioridad precisa de una operación separada de la aplicación, en la que se posicionan los rodales dentro del campo (manual o automáticamente). Este es el enfoque más extendido en la actualidad, a pesar de los inconvenientes que presenta. En primer lugar está el incremento del coste debido a la doble operación (detección/aplicación). Por otro lado, puede ocurrir una falta de acuerdo entre los rodales detectados en un momento determinado y la realidad en el momento de aplicación, en el caso de que ambas operaciones estuvieran muy separadas en el tiempo. Obviamente, este enfoque está muy condicionado por la estabilidad de los rodales, estando aconsejado especialmente para aquellas especies con una estabilidad espacial relativamente alta. Otros aspectos que pueden limitar la utilización de los tratamientos loca-

lizados en base a mapas son la resolución espacial y la superficie mínima de tratamiento que, en caso de ser demasiado grande, el ahorro de herbicida es tan bajo que no compensa los gastos de la elaboración de los mapas. Es decir, la información del mapa previo ha de ser transformada en un mapa de aplicación continua estimado por interpolación y adaptado a las características técnicas del equipo de pulverización (Figura 47). En algunos casos, es necesaria la adición de zonas de seguridad o “buffer” alrededor del perímetro del rodal, cuya intención es compensar los tiempos de reacción del equipo de tratamiento desde que se da la orden de aplicar hasta que el herbicida llega a las boquillas. La desventaja de utilizar buffers es que finalmente se tratan áreas más amplias y zonas sin infestación real (Figura 48), disminuyendo el beneficio económico y causando mayor impacto ambiental al utilizar más producto herbicida.

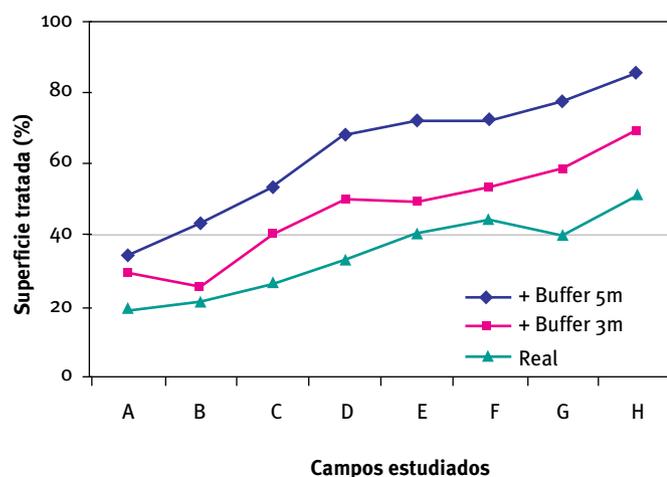
#### 5.3.2 Tratamientos en tiempo real

La aplicación “en tiempo real” consiste en pulverizar los rodales de malas hierbas inmediatamente tras su detección. Se prevé una mayor aceptación de estos sistemas en el futuro y es donde se concentran los mayores esfuerzos, dado que la generación de mapas previos supone un gran coste debido al post-procesamiento de los datos.

**Figura 47. a) Mapa creado por interpolación a partir de los datos de estimación visual de *Sorghum halepense* desde la cabina de una cosechadora; b) Mapa de aplicación obtenido del anterior mediante la generación de celdas de 6 x 6 m para tratamiento diferenciado**



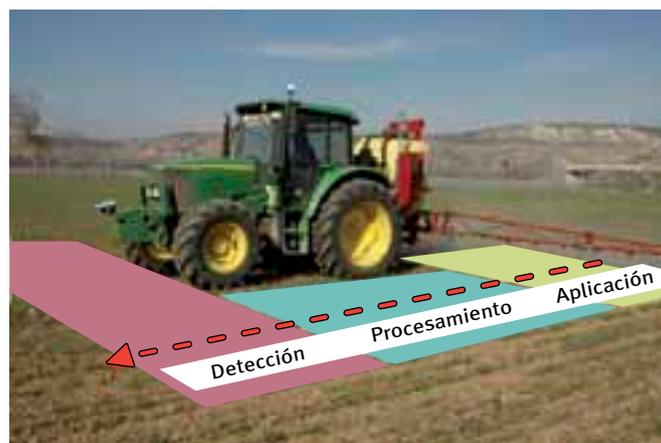
**Figura 48. Superficie tratada en diferentes campos de maíz resultante de una aplicación diferenciada sobre la infestación detectada (real), y sobre esta misma superficie a la que se añade un *buffer* de 3 m (+ *Buffer* 3 m) o un *buffer* de 5 m (+ *Buffer* 5 m)**



El esquema más sencillo de un sistema de aplicación en tiempo real consiste en posicionar el equipo de detección en la parte delantera del tractor, utilizando el tiempo transcurrido desde la detección de las malas hierbas hasta la aplicación de herbicida por parte del equipo pulverizador situado en la zona trasera del tractor, para el procesamiento de la información recogida por el sensor delantero (Figura 49). En la actualidad, las aplicaciones en tiempo real están siendo utilizadas comercialmente en tratamientos de malas hierbas en las vías de tren, o en zonas urbanas (en las zonas de afloramiento entre las grietas del pavimento). La detección de estos sistemas se realiza mediante espectroscopia, con sensores que en tiempo real distinguen la presencia de vegetación y no las especies vegetales, lo que permite un gran ahorro en el procesamiento de la información. El reto consiste en desarrollar sistemas de detección con capacidad de discriminar especies vegetales, lo que aumentaría el abanico de posibilidades en las aplicaciones herbicidas, por ejemplo diferenciando el cultivo de las malas hierbas, aspecto que mejoraría la eficiencia del manejo localizado de las poblaciones arvenses.

Existe una serie de desventajas en las aplicaciones en tiempo real que no se presentan en el enfoque basado en un mapa previo de infestación. La mayor limitación

de estos sistemas es la necesidad de contar con equipos capaces de almacenar gran cantidad de datos y que dispongan de alta velocidad de procesamiento de la información tomada por los sensores, para la generación de una respuesta de tratamiento de forma prácticamente instantánea. Hoy por hoy, estos equipos presentan un elevado coste económico no asumible en la situación de la agricultura actual. Por otro lado, al carecer de información espacial previa, no se puede conocer la cantidad de producto a utilizar, lo que puede provocar un residuo de materia activa que no es aprovechada, traduciéndose en una pérdida económica (excedente de producto a desechar que la maquinaria ha tenido que transportar de forma innecesaria durante el periodo de trabajo, aumentando el consumo de combustible) y en un perjuicio medioambiental (remanente de producto no utilizado). No obstante, la aplicación en tiempo real puede crear de forma paralela un mapa de las zonas tratadas o infestadas, que puede ser utilizado en estudios posteriores o como base para el conocimiento de la posición de las malas hierbas en futuras aplicaciones de herbicida.



**Figura 49. Sistema de tratamiento en tiempo real con sensor de vegetación situado delante del tractor**

### 5.3.3 Equipos de aplicación

En ambos casos, tratamientos en base a mapas o tratamientos en tiempo real, es necesario adaptar la respuesta de los sensores de detección a las tecnologías de pulverización disponibles, es decir, a la capacidad del equipo para variar su respuesta según la información proveniente del procesador. De modo general, existen

dos puntos en los pulverizadores que pueden ser objeto de modificación para obtener la respuesta buscada: i) secciones de barra; y ii) boquillas de pulverización. Así, los pulverizadores que disponen de secciones de barra pequeñas, y alta velocidad de apertura y cierre de dichas secciones, tienen la posibilidad de utilizar una gran resolución de trabajo (tamaño de píxel de menor superficie), con una eficiencia en los tratamientos localizados muy alta (o sea, con ahorro considerable al evitar tratar zonas limpias derivadas de un tamaño de píxel excesivo), lo que incrementará los beneficios tanto ambientales como económicos. Por otro lado, la amplia oferta de boquillas en el mercado proporciona nuevas posibilidades de aplicación específica y variación de dosis. En especial, para este tipo de tratamientos localizados son muy interesantes dos tipos de boquillas: i) boquillas de pulsos; y ii) sistemas Vario-Select. En ambos casos se puede modificar la dosis aplicada de forma prácticamente instantánea, aunque el principio de actuación en ambos casos es diferente. Las boquillas por pulsos acoplan una electroválvula de apertura/cierre que varía la dosis aplicada en cada zona en base al número de ciclos por segundo (Hz). El sistema comercial Vario-Select consta de un cuerpo con varias boquillas independientes, modificando la dosis según el número de ellas que se encuentran abiertas en cada momento.

Por tanto, la flexibilidad de los equipos de pulverización modernos en cuanto a secciones de barra y boquillas de dosis variable posibilita realizar un manejo localizado de las malas hierbas, logrando el doble objetivo de mejorar las condiciones económicas de la agricultura, y de reducir el impacto ambiental en los agrosistemas, debido a la disminución de los insumos necesarios en cada aplicación.

### **5.3.4 Toma de decisiones en la aplicación de herbicidas**

Llegado a este punto, surge la pregunta sobre cuál es la mejor estrategia de manejo localizado de las malas hierbas. En realidad, no existe una solución universal, sino que la mejor estrategia será aquella que en mayor medida se aproxime a las necesidades de cada campo en particular. Fundamentalmente, podemos distinguir

dos formas de tratamiento localizado: i) tratar solo los rodales, dejando sin tratar el resto del campo; y ii) dosificación variable en todo el campo. En el caso que el pulverizador solamente tenga capacidad de “abrir/cerrar”, la única decisión que podemos practicar es tratar los rodales. Por el contrario, si tenemos la posibilidad de dosificación variable, debemos decidir si queremos realizar un tratamiento como el anterior o bien utilizar dosis diferentes en cada zona.

Si conocemos el umbral económico de las especies arvenses (densidad de planta capaz de producir una pérdida de cosecha del mismo valor que el precio del tratamiento herbicida) podemos ajustar las dosis a las necesidades reales. Como es difícil conocer dicho umbral económico para todos los cultivos y especies de malas hierbas, la estrategia más sencilla para los usuarios es adoptar alguna de las dos formas de manejo localizado presentadas anteriormente: i) tratar/no tratar, evitando la decisión sobre la dosis a utilizar (esta es la práctica más común debido a que la mayoría de los pulverizadores solo tiene capacidad de apertura y cierre de secciones); se acepta este sistema como el más rentable económicamente. Y ii) aplicaciones semi-diferenciales, que utilizan dosis bajas y altas en zonas libres e infestadas, respectivamente. Este sistema es particularmente rentable en monocultivo, ya que podría controlar pequeños focos o plantas aisladas que con el sistema anterior no serían tratadas, evitando problemas futuros (Paice *et al.*, 1998).

### **5.3.5 Beneficios económicos**

La agricultura de precisión obviamente persigue la rentabilidad del proceso productivo, de manera que el ahorro en productos herbicidas debe compensar los costes derivados del mapeo de las malas hierbas, del tratamiento de esta información mediante sistemas de información geográfica (SIG), además del desarrollo y aplicación de los tratamientos localizados. El escenario más interesante se encuentra en las parcelas con menores niveles de infestación (Luschei *et al.*, 2001; Barroso *et al.*, 2004), especialmente si los rodales presentan tamaños y formas adecuadas para un fácil tratamiento.

Son escasos los estudios que han evaluado los beneficios económicos netos de la aplicación localizada de herbicidas, por lo que no está claro qué tratamiento resulta más rentable, si el manejo diferenciado “tratar/no tratar” o las aplicaciones que intentan minimizar el riesgo tratando con dosis bajas las zonas no infestadas. En cualquier caso, está aceptado que el manejo localizado permite aumentar ligeramente los beneficios con respecto a las técnicas tradicionales de manejo de malas hierbas (Tabla 18). No obstante, el establecimiento de estas tecnologías está condicionado en gran medida por el tamaño de las parcelas, ya que el coste de adquisición de este equipo no es asumible en las explotaciones de pequeño y mediano tamaño.

**Tabla 18. Beneficios estimados (€ ha<sup>-1</sup>) para seis tipos diferentes de manejo de la mala hierba *Sorghum halepense* en campos de maíz de la Comunidad de Madrid**

	Campo A	Campo B	Campo C	Media
<b>Manejo tradicional (en todo el campo)</b>				
No aplicar	929.7	881.0	919.5	910.1
Aplicar dosis completa	923.0	923.0	923.0	923.0
Aplicar media dosis	933.3	914.3	929.0	925.6
<b>Manejo localizado (rodales/zona sin malas hierbas)</b>				
Dosis completa/no aplicar	943.7	915.0	932.5	930.4
Media dosis/no aplicar	931.7	895.7	920.5	915.9
Dosis completa/media dosis	922.3	910.3	918.5	917.1

### 5.3.6 Ahorro de herbicidas

Un aspecto fundamental de la agricultura de precisión es el ajuste de insumos a las necesidades reales del cultivo. En este sentido, se han realizado varios estudios cuyos resultados ponen de manifiesto importantes reducciones de la cantidad de herbicida em-

pleado con respecto a las aplicaciones tradicionales (Tabla 19). Otros enfoques en el marco de la agricultura de precisión consistirían en aplicar herbicidas en base a umbrales de riesgo (Gerhards *et al.*, 2002), o en el ajuste de las dosis y materias activas a las especies arvenses y densidades presentes (Faechner *et al.*, 2002). Estos enfoques supondrían un gran ahorro, estimándose una disminución en el uso de herbicidas en torno al 50% en un plazo de 4 a 6 años (Timmermann *et al.*, 2003).

**Tabla 19. Estimación del ahorro de herbicida (%) para tres estrategias simuladas de manejo localizado de la mala hierba *Sorghum halepense* en campos de maíz de la Comunidad de Madrid**

	Campo A	Campo B	Campo C	Media
<b>Rodales/zona sin malas hierbas</b>				
Dosis completa/no aplicar	65	61	73	66
Media dosis/no aplicar	82	81	86	83
Dosis completa/media dosis	32	31	36	33

Respecto a la estrategia de dosis variable, existen autores que defienden que una reducción de la dosis de muchos herbicidas no afecta significativamente su eficacia de control, ni a los rendimientos del cultivo (Zhang *et al.*, 2000), lo que supondría una mejora de la rentabilidad. No obstante, este enfoque continúa siendo polémico, ya que existen autores que mantienen que la utilización de dosis reducidas podría ocasionar el desarrollo de resistencias en las malas hierbas a los herbicidas aplicados.

### 5.3.7 Nuevas propuestas

La detección de las malas hierbas es crítica para la implementación de tecnologías que permitan el manejo de la variabilidad espacial de las poblaciones arvenses. Por ello, se están invirtiendo grandes esfuerzos en la mejora de los sistemas de visión y unidades de procesamiento de datos. El reto más importante

es crear equipos capaces de discriminar, bajo todo tipo de situaciones, cultivo y malas hierbas. Un paso adicional consiste en identificar especies en diferentes estados de desarrollo, en condiciones de solapamiento, con diferentes condiciones de iluminación, etc. Todo esto, con capacidad de procesamiento en un tiempo lo suficientemente corto como para permitir la aplicación de herbicidas a la velocidad de trabajo habitual.

Además, la creciente demanda en la reducción de herbicidas hace que otros enfoques relacionados con las técnicas de micropulverización cobren fuerza. Estas técnicas consisten en realizar tratamientos planta a planta y no a áreas infestadas, lo que requiere equipos pequeños con gran cantidad de boquillas de tratamiento. La evolución de estos sistemas se dirigirá probablemente hacia la creación de robots autónomos que se moverán libremente en el campo, realizando las tareas de pulverización sin la necesidad de la supervisión humana.

Conviene no olvidar la posibilidad de combatir las malas hierbas de forma mecánica y no química. En este sentido, se están desarrollando nuevos aperos capaces de eliminar por procedimientos físicos las malas hierbas: por impacto, electrocución, rozamiento (Figura 50) o abrasión.



Figura 50. Grada canadiense con inclinación variable autónoma basada en la densidad de malas hierbas (Rueda & Gerhards, 2009)



# 6 Ahorro y eficiencia energética derivados de nuevas tecnologías de abonado

---

## 6.1 Introducción

La optimización de la producción superficial de un cultivo depende, en gran medida, de las condiciones ambientales y de la capacidad del agricultor para identificar y manejar los factores de producción, entre los cuales tiene especial importancia el abonado. Todos los cultivos requieren cantidades variables de hasta 14 elementos minerales diferentes que acumulan predominantemente a través de sus raíces. El concepto de fertilidad de un suelo refiere a la disponibilidad de esos nutrientes para la planta a lo largo de su desarrollo. Además de la cantidad y disponibilidad de los nutrientes del suelo, la fertilidad también tiene en cuenta la capacidad del sistema para evitar las pérdidas de los nutrientes.

Tradicionalmente, los agricultores han sabido que las superficies consideradas como unidades a efectos legales, geográficos, económicos o de gestión y manejo, pueden presentar una significativa variabilidad en lo que a fertilidad se refiere. En el pasado, cuando las extensiones de terreno trabajadas por un agricultor se limitaban a las que podían ser abarcadas con sus animales, era fácil conocer las particularidades de cada pequeña porción de superficie, lo que permitía una fertilización diferencial dentro de la parcela cultivada. La introducción de maquinaria con mayores capacidades de trabajo permitió que la superficie trabajada por cada agricultor creciera, aparcando la idea de tratamientos diferenciales a lo largo de una misma parcela. Las máquinas se diseñaban buscando una aplicación homogénea en toda su anchura de trabajo; que el operario modificara continuamente la regulación de la máquina en una misma parcela para adaptarse a las necesidades de cada zona era inviable.

Este modelo ha dado lugar a aplicaciones deficitarias en algunas zonas de las fincas, con el consecuente perjuicio en la producción, y a aplicaciones excesivas en otras, implicando pérdidas económicas y problemas medioambientales. Considerando el coste que la fertilización supone en los cultivos, no es de extrañar que la filosofía de aplicar tratamientos diferenciados en cada punto de la finca

resurgiera en esta tarea agrícola, y que los primeros equipamientos comerciales para aplicación variable de insumos se centraran en las abonadoras.

Es necesario señalar que las prácticas de dosis variable de abonado son recomendables en situaciones donde, en la parcela, exista una alta variabilidad de fertilidad, y los rendimientos varíen en función de ella. Bajo estas condiciones, idealmente debieran aplicarse manejos diferenciales dentro del sitio en términos de fertilización, disponiendo tantas dosis como áreas significativamente homogéneas existan en la explotación, en vez del tradicional manejo promedio utilizado en la actualidad.

La aplicación variable de fertilizantes agrupa un amplio rango de posibilidades de organización del trabajo, en todas ellas se incluye algún sistema para el muestreo intensivo del suelo y la aplicación de sistemas que varíen la cantidad de fertilizante aplicada a cada zona de la parcela. La información del muestreo intensivo del suelo ha de analizarse para establecer las recomendaciones de dosis de abonado en las correspondientes zonas subparcelarias.

Otro elemento de la agricultura de precisión que permite la optimización de la cantidad de productos fertilizantes aplicada es la incorporación de los sistemas de posicionamiento global (GPS). Estos sistemas facilitan el guiado de la máquina y evitan los solapes y las franjas sin tratar en el terreno, lo que puede suponer ahorros de fertilizantes de hasta el 5%.

## 6.2 Adquisición de información relativa al abonado diferencial

La distribución del abono en dosis variable requiere previamente la adquisición de datos sobre la fertilidad del suelo y/o el estado del cultivo mediante:

- La detección remota (imágenes de satélites o con vuelos tripulados).
- Registro sobre el terreno:
  - Toma de muestras y análisis químicos para confeccionar un mapa de fertilidad.

– Sistemas que se basen en sensores en tiempo real a bordo de equipos móviles que conducen a respuestas inmediatas, midiendo:

- La fertilidad del suelo, o
- El vigor vegetativo del cultivo.

Mientras que la detección remota está especialmente indicada para el seguimiento de propiedades espaciales dinámicas tales como la evolución vegetativa de grandes extensiones de cultivo, la caracterización sobre el terreno se adapta mejor al registro de propiedades espacialmente más estáticas relacionadas con la fertilidad, empleando para ello una mayor resolución espacial.

La información acumulada en años precedentes sobre la variabilidad del contenido en nutrientes en el suelo y la producción superficial, sirve de base para el establecimiento de estrategias de abonado diferencial. Esta aplicación variable genera a su vez nuevos resultados en la producción, que pasan a incrementar el volumen de información a manejar.

### 6.2.1 Sensores para la cuantificación de la fertilidad del suelo

En la última década del siglo XX han proliferado distintos sensores eléctricos y electromagnéticos, ópticos, mecánicos, electro-químicos, acústicos y neumáticos, que pueden ser incorporados a vehículos móviles para la caracterización del suelo. La mayoría de ellos tiene como característica común su sensibilidad a más de un factor agronómico del suelo (ver Tabla 20); los dos últimos se encuentran aún lejos de una fase comercial y no serán considerados en este artículo.

De la Tabla 20 se deduce que los sensores eléctricos y electromagnéticos, junto con los ópticos, son los más inespecíficos (textura, materia orgánica, contenido en agua, nitratos, capacidad de intercambio catiónico –CIC), mientras que los mecánicos son muy específicos de las propiedades estructurales del suelo (densidad aparente y presencia de suela de labor). Los sensores electro-químicos permiten detectar independientemente parámetros como la salinidad, el pH,

y la composición en una variedad de iones (potasio, nitratos, magnesio). Dos sensores son tanto más complementarios cuanto más distintos son los parámetros que determinan, y tanto más redundantes cuanto más

coinciden en las características registradas. El reto por tanto es seleccionar la combinación de tecnologías con una mayor potencialidad, aspecto que discutiremos al término de la presentación de los distintos sensores.

**Tabla 20. Sensores disponibles para el análisis dinámico de suelos y atributos evaluados con cada uno de ellos.** (Adamchuk y cols. 2004)

	Textura	Materia orgánica	Humedad	Salinidad	Compactación	Suela Labor	pH	N	K	CIC
Eléctricos y EM	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓
Ópticos	✓	✓	✓				✓	✓		
Mecánicos					✓	✓				
Electro-químicos				✓		✓	✓	✓		

### 6.2.1.1 Sensores eléctricos y electromagnéticos

El parámetro eléctrico a determinar es la conductividad eléctrica aparente (ECa en inglés,  $\text{-mSm}^{-1}$ ) que es un promedio de la circulación eléctrica por tres vías distintas: 1) la fase líquida del suelo que tiene nutrientes disueltos, 2) la fase sólido-líquida debida al intercambio de cationes asociado con arcillas y minerales, y 3) la fase sólida derivada del contacto físico entre partículas sólidas; una explicación detalla de la contribución de cada uno de estos factores a la ECa puede encontrarse en Corwin y Lesch (2005). No debe confundirse la ECa con la ECe ( $\text{dSm}^{-1}$ ) que refiere la conductividad eléctrica determinada en el extracto saturado del suelo.

Existen tres grandes casas comerciales que comercializan equipos para la determinación de las propiedades eléctricas del suelo: VERIS (3100), GEO-CARTA (ARP), y GEONICS (EM31 y 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, tanto de corriente como de voltaje. En estos equipos, se denomina configuración Werner a aquella que emplea cuatro electrodos alineados y equi-espaciados (Figura 51), en la que los electrodos externos realizan la función de transmisión de corriente mientras que los internos efectúan la determinación del potencial. En este caso la profundidad de penetración de la corriente y el volumen de

suelo evaluado aumentan proporcionalmente con la distancia entre electrodos (a), y en el caso de un suelo homogéneo el volumen evaluado es aproximadamente  $\pi a^3$ .

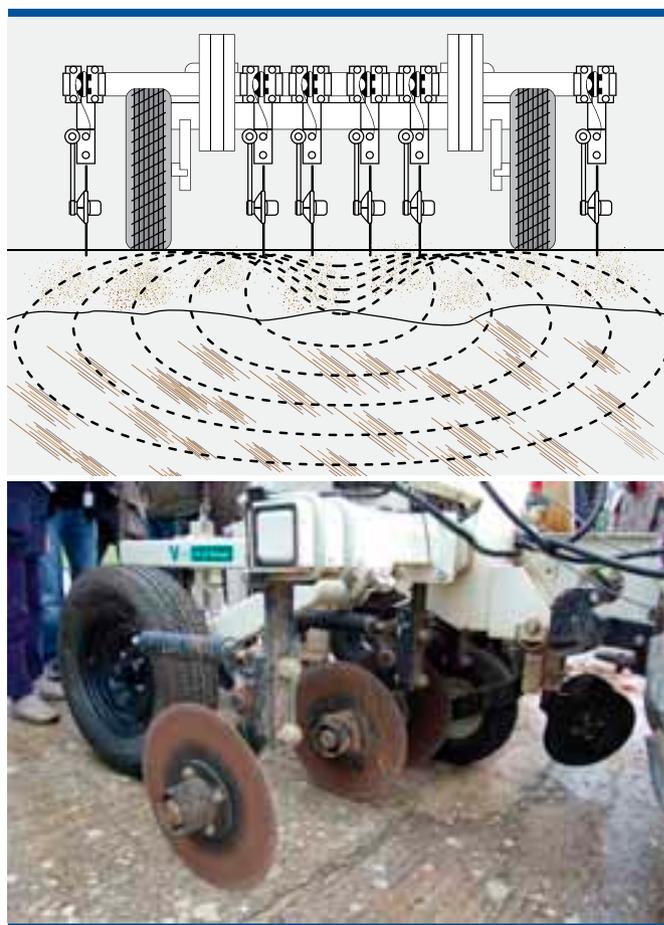


Figura 51. Disposición de los electrodos en equipos ERDC: 3100 VERIS (arriba) correspondiente a una configuración Werner, y ARP GEO-CARTA (abajo). La existencia de electrodos de potencial a distancias distintas permite obtener información a diferentes profundidades



Figura 52. Equipo EM-38 de Geonics, para realización de mapas de inducción magnética

Los métodos ERDC son invasivos dado que implican la introducción de electrodos en el suelo, y ofrecen determinaciones menos fiables que los procedimientos electromagnéticos en suelos muy secos o pedregosos. La principal ventaja de esta tecnología es que la profundidad y el volumen de suelo evaluado pueden modificarse de forma sencilla sin más que alterar la distancia entre electrodos. Además, dado que la medida de ECa es lineal en toda la profundidad evaluada, es posible derivar la EC correspondiente a un determinado rango de profundidad sin más que realizar pasadas sucesivas con una distancia creciente entre electrodos.

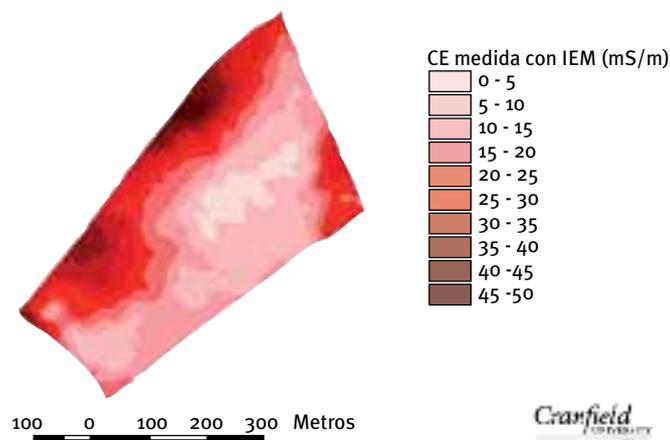
Los equipos comerciales basados en inducción electromagnética (EM) emplean corriente alterna que al circular por una bobina emisora generan un campo magnético en el suelo, que a su vez genera una corriente eléctrica en una bobina receptora (Figura 52). La señal es posteriormente amplificada y acondicionada en voltaje, siendo proporcional al volumen de suelo evaluado y a la ECa del mismo. Es posible conseguir profundidades variables con un equipo EM variando la posición de la bobina de horizontal ( $EM_h$ ) a vertical ( $EM_v$ ), siendo mayor cuando la bobina se encuentra en posición horizontal que vertical (0,75 m y 1,5 m para GEONICS EM-38v y EM-38h, respectivamente).

Recientemente, GEONICS ha introducido en el mercado un equipo dual (EM-38 dual-dipole) que dispone de una bobina horizontal y otra vertical que van alternando sus medidas cada varios segundos. Según Corwin y Lesch (2005), la relación de conductividades aparentes obtenidas con  $EM_h$  y  $EM_v$  refleja las propiedades de conductividad hidráulica del suelo, y permite evaluar la lixiviación de nutrientes. Según estos mismos autores, la media geométrica en  $EM_h$  y  $EM_v$  está relacionada con las propiedades químicas de la fracción acuosa del suelo.

La medida de ECa revela la heterogeneidad del suelo debida a variaciones de textura, salinidad, materia orgánica, contenido en agua, y profundidad de la capa de erosión de arcilla. La ECa está positivamente relacionada con el contenido en arcilla, la densidad aparente del suelo, el pH, la temperatura, y la ECe obtenida en extracto 1:1 para muestras de suelo a un máximo de 30 cm de profundidad. Por el contrario, la ECa está negativamente relacionada con el contenido en agua, la materia orgánica y el contenido total de nitrógeno y carbono. El hecho de que la constante dieléctrica del agua sea un orden de magnitud superior a la del suelo, hace que la medida de la ECa sea muy atractiva para determinar el contenido de agua; algunos autores indican que el 84% de la variabilidad de un suelo puede ser debida exclusivamente a ello. La Figura 53 muestra un ejemplo de mapeado de la ECa.

Figura 53 Ejemplo de mapa de conductividad eléctrica aparente (ECa) obtenido con un equipo EM38

Mapa EMI, de una cuadrícula de 10 x 24 m



Un aspecto importante en los equipos EM es que tanto la velocidad de operación, como la altura de la bobina respecto al suelo, o la temperatura ambiente en relación con la electrónica del instrumento pueden generar derivas importantes, por lo que todo ello ha de ser tenido en cuenta y en su caso corregido.

Un tercer dispositivo capaz de evaluar la ECa del suelo es el TDR (reflectometría en el dominio del tiempo). Este procedimiento está basado en el tiempo que necesita un pulso de voltaje para recorrer una probeta de suelo hacia abajo y vuelta, evaluando asimismo la atenuación de la señal durante el trayecto. Tiene la ventaja de que permite determinar independientemente el contenido en agua y la ECa, aunque su determinación en tiempo real montado sobre un equipo en marcha no está resuelto todavía.

### 6.2.1.2 Sensores ópticos

Históricamente el color del suelo (reflectancia en la zona visible del espectro electromagnético, 400-700 nm) ha sido uno de los parámetros más obvios empleados en la caracterización de la heterogeneidad del suelo agrícola. Más recientemente se ha incorporado el infrarrojo cercano (NIR, 700-2400 nm), banda donde los grupos funcionales C-H, N-H, y O-H absorben energía, de manera que resulta idónea para cuantificar distintas formas de carbono, nitrógeno y agua, respectivamente.

El método más adecuado para la obtención de información espectrofotométrica del suelo de forma dinámica es la instalación de una ventana de zafiro en la base de una reja (Figura 54) de manera que el movimiento de la herramienta genera un efecto de auto-limpieza, y la ventana no se ve afectada por polvo en suspensión en el aire. Este tipo de dispositivos exige un proceso frecuente de autocalibración respecto a referencias internas y es capaz de trabajar a un máximo de 6 km/h (50 ms para obtener un espectro).



Figura 54. Equipo espectrofotométrico comercializado por la empresa VERIS, trabajando sobre rastrojo. Inferior: detalle de la reja por dentro de la cual viaja la señal óptica

Al igual que los sensores eléctricos y electromagnéticos, los sensores ópticos responden frecuentemente a una combinación de atributos del suelo: contenido en agua, materia orgánica, nitrógeno y carbono total. Sin embargo, la respuesta espectral de distintos rangos de longitud de onda está afectada a distinto nivel por dichos atributos, de manera que es posible según los casos aislar el efecto de cada uno de ellos.

En la aplicación de las propiedades ópticas destaca la evolución hacia rangos de longitud de onda más amplios (empleo de detectores multicanal de silicio junto con otros, indio-galio arsénico) y técnicas de procesamiento de datos multidimensionales que combinan procesos de transferencia de calibración para distintas zonas, y de identificación de espectros anómalos. La Tabla 21 resume algunos de los resultados disponibles desde su inicio en los años 90 del siglo XX.

**Tabla 21. Capacidad predictiva de los métodos ópticos espectrofotométricos para la caracterización del suelo.**

(Fuente: Christy, 2007)

	1991 En laboratorio 660 nm	1999 En campo 4 longitudes de onda entre 400 y 2.400 nm	2003 En campo Todas longitudes onda entre 900-1.700nm	2007 En campo Todas longitudes onda entre 900-1.700nm
Materia orgánica	r <sup>2</sup> =0,71	r <sup>2</sup> =0,87	-	r <sup>2</sup> =0,80
pH	-	r <sup>2</sup> =0,61	r <sup>2</sup> =0,72	r <sup>2</sup> =0,62
ECa	-	r <sup>2</sup> =0,64	-	r <sup>2</sup> =0,68
Contenido en agua	-	r <sup>2</sup> =0,68	r <sup>2</sup> =0,82	r <sup>2</sup> =0,65
Nitrógeno total	-	-	r <sup>2</sup> =0,86	-
Carbono total	-	-	r <sup>2</sup> =0,87	r <sup>2</sup> =0,92

### 6.2.1.3 Sensores electro-químicos

Los sensores electro-químicos han sido tradicionalmente empleados en laboratorio para determinar la fertilidad del suelo, tal es el caso de los consabidos electrodos de vidrio para la determinación del pH. La Tabla 22 resume algunos de los electrodos disponibles a nivel comercial para determinar protones, potasio y nitratos.

La empresa VERIS comercializa un dispositivo para la medida directa en suelo (DSM), empleando para ello una matriz de ISEs y un tanque de agua que favorece la humectación del suelo (Figura 55); la duración de cada medida se sitúa entre 5 y 15 s.

Desde finales de los 90 del siglo XX, se han incorporado al mercado electrodos ion-específicos encapsulados en PVC, o los más novedosos transistores de efecto de campo (FET) también ion-selectivos (ISFETs). Los ISFETs tienen algunas ventajas sobre el resto, como son: sus reducidas dimensiones, la baja impedancia de salida, la elevada relación señal ruido y la rapidez de respuesta (2-5 s). Tan sólo los ISFET para pH se encuentran ampliamente disponibles a nivel comercial, aunque se han desarrollado chips multi-ISFET que se encuentran en evaluación a nivel de prototipo.

**Tabla 22. ISEs evaluados por Adamchuk y cols. en 2005 para su incorporación a un dispositivo de análisis dinámico del suelo. Los electrodos de pH son actualmente empleados por la compañía VERIS en una plataforma móvil para el análisis electro-químico del suelo; b:Nico scientific Inc, c: Erlich Industrial Development (EID) Corp.**

Ise	Modelo	Tipo	Precisión (pX)	Exactitud (pX)
pH	p17 <sup>b</sup>	Vidrio	0,12	0,16
pH	EID-E-FPH-DOME <sup>c</sup>	Vidrio	0,12	0,19
pH	EID-E-FPH-A001 <sup>c</sup>	Vidrio	0,11	0,20
pK	detecIONTM 30318N <sup>b</sup>	PVC	0,13	0,15
pK	EID-E-CIX-AoKT <sup>c</sup>	PVC	0,17	0,17
pNO <sub>3</sub>	detecIONTM 30218N <sup>b</sup>	PVC	0,19	0,12
pNO <sub>3</sub>	EID-E-CIX-AONO <sup>c</sup>	PVC	0,22	0,17

Para todos los sensores electro-químicos, la unidad empleada en la determinación de la concentración es el pX; es decir, el menos logaritmo de la concentración molar del ión X en agua.



Figura 55. Plataforma móvil para el análisis directo de suelo mediante matrices de electrodos ISE

Es importante remarcar que el error de precisión obtenido con los ISEs en laboratorio es siempre muy inferior al registrado en los equipos de medida directa en campo. Un reciente estudio de 2007, indica que el error de precisión en pH, pK y pNO<sub>3</sub> se multiplica por 2, 15 y 20, respectivamente, cuando comparamos las medidas directas en campo con las de laboratorio.

### 6.2.2 Tecnologías para la determinación del vigor vegetativo en tiempo real durante el abonado

En la actualidad se comercializan sistemas para la estimación de las necesidades de nitrógeno en tiempo real. Se componen de sensores que miden la luz reflejada por el cultivo. La reflexión de la luz por el cultivo, relacionada directamente con la cantidad de clorofila y la cantidad de biomasa, es traducida en tiempo real en necesidades de nitrógeno, modificándose las condiciones de funcionamiento de la abonadora en función de las lecturas del sensor (Figura 56 y Figura 72).



Figura 56. Sensor espectrofotométrico de vigor vegetativo colocado sobre el tractor para aplicación variable de nitrógeno en tiempo real (N-sensor, Yara)

## 6.3 Sistemas para la aplicación diferencial de fertilizantes: tecnologías de dosis variable

Una vez establecida la cantidad de dosis a aplicar en un área subparcelaria es necesario disponer de equipos capaces de modificar en continuo y de forma automática las condiciones de trabajo. En este apartado es de interés reseñar el concepto de resolución espacial, que es el resultado de dos factores: la resolución transversal; esto es, la anchura de trabajo en la cual se puede variar la dosis, y la resolución longitudinal; es decir, la mínima longitud en la cual la dosis aplicada puede ser modificada. La resolución longitudinal viene determinada por el tiempo que el dispositivo de distribución tarda en regular la dosis cuando pasa de una zona en la que debe aplicar una dosis a otra en la que la dosis correspondiente es diferente.

En este momento, el mercado ofrece numerosos equipos capaces de regular en continuo las condiciones de aplicación de fertilizantes. Las casas comerciales más importantes cuentan con modelos de abonadoras centrífugas equipadas con diferentes sistemas de control (volumétricos, másicos, ...) que permiten la conexión directa al sistema GPS para la distribución de abono de acuerdo con un mapa de fertilización preestablecido. A partir de controladores del tipo caudal proporcional al avance, estos equipos incorporan elementos eléctricos o hidráulicos que son los encargados de modificar, finalmente, el grado de apertura del orificio dosificador del fondo de la tolva para ajustarlo a las variaciones de la velocidad y a las diferencias de dosis reflejadas en el mapa de aplicación.

Las abonadoras neumáticas se caracterizan por tener mayor uniformidad de distribución, por lo que están más adaptadas a la agricultura de precisión. La variación de la dosis se realiza modificando la velocidad de los rodillos dosificadores, accionados por la toma de fuerza o por una rueda accionadora que gira sobre el suelo. En el caso de abonadoras adaptadas para la aplicación variable, el control de la velocidad de giro del rodillo dosificador se regula en función de la velocidad de

avance, la dosis que se quiere distribuir, la calibración efectuada y la anchura de trabajo. El paso de una dosis a otra es rápido y uniforme. Con este tipo de abonadoras se puede distribuir simultáneamente diversos tipos de abono mediante tolvas separadas y un sistema de regulación de caudal en cada una.

De igual forma se han desarrollado equipos para aplicación variable de estiércoles y purines. En el caso de distribución de purines, se varía el caudal aplicado por las rejillas inyectoras. En los equipos esparcidores de estiércol, la dosis variable se consigue modificando la velocidad de desplazamiento del fondo móvil del remolque distribuidor.

## 6.4 Consideraciones económicas

La experiencia acumulada en la utilización de abonado con dosificación variable (DV) en otros países, como EEUU, no es clara en lo relativo a la rentabilidad de esta tecnología, y aporta consideraciones más bien pesimistas. Así, Brouder y Lowenberg-DeBoer (2000) destacan que, tras una década de uso, la reducción en fertilizante no es suficiente para compensar los costes extra del análisis de suelo y de la máquina con DV. Estas consideraciones se basan en cálculos de costes realizados a partir de análisis químicos de suelo en laboratorio. Los modernos sistemas con sensores de suelo tienen pocos años de vida y todavía no hay datos suficientes para calcular su rentabilidad. Está claro que permitirán realizar medidas rápidamente (miden en tiempo real) y de forma sistemática en cada campaña, pero en este momento no puede asegurarse su rentabilidad.

Los recientes avances en el desarrollo de sensores para la caracterización de parámetros físicos del suelo son prometedores, y ya se han materializado en equipos comerciales. Sin embargo, es destacable que estos sistemas no eliminan completamente los costes asociados a un muestreo sistemático y los análisis de laboratorio derivados. Esto es debido a que dichos sensores están influidos por muchas variables del suelo, y por tanto precisan calibraciones de las condiciones específicas, aunque no en todas las campañas.

En general, el resultado más frecuente obtenido por los agricultores es que la cantidad de abono empleada se mantiene bastante constante con respecto a la aplicación uniforme, ya que lo que mejora es su distribución por la parcela.

Si esto es así, se podrían esperar al menos mejoras en la productividad de los cultivos, ya que cada zona recibe exactamente lo que necesita con la tecnología de DV. Sin embargo, la demostración de que un aumento productivo se debe a la DV y no a las variaciones previas del suelo, agua, etc. es difícil.

Algunos estudios estiman los costes de emplear maquinaria con tecnología de DV aportada por una empresa de servicios entre 2 y 10 €/ha (Akridge, 2000) o al menos entre 1,5 y 2,5 €/ha de coste adicional a la aplicación uniforme en el caso de usar una máquina con DV propia (Brouder, 2000). Sumados a los costes del muestreo y/o a los sensores de suelo, la adopción de estas tecnologías dependerá del beneficio adicional conseguido en cada caso.

## 7 La recolección empleando técnicas de agricultura de precisión

El proceso de la recolección de cultivos es el que ha estado más asociado a la imagen tradicional de la agricultura de precisión (AP), debido a que en las primeras fases de desarrollo de las mismas se hizo un mayor esfuerzo en dotar a la cosechadora de grano de los sensores necesarios para realizar mapas de productividad superficial (Figura 3). Por ello, en un contexto de ahorro energético como el de esta publicación, tiene sentido pensar si la cosecha es una oportunidad para el ahorro de insumos o sólo un medio para la toma de datos que se analizarán posteriormente.

### 7.1 La batería de sensores

Así, la imagen típica de la AP es la cosechadora integral de cereales representada en la Figura 4 del primer apartado de esta publicación, si bien cualquier cosechadora integral de cierto cultivo estaría dotada de los siguientes sistemas:

- 1 Sensor de producción, situado normalmente en el final del elevador de producto limpio: sirve para cuantificar el caudal o flujo (kilogramos por segundo) de producto que va cayendo en la tolva. Existen varios tipos de sensores de “rendimiento”:
  - a) Sensor de impacto: dotado de una placa metálica, el impacto de los granos contra ella es detectado por un transductor que aporta una señal proporcional a la fuerza ejercida. En el caso de otros cultivos se han empleado placas de impacto para “pesar” patatas o remolachas al caer en la tolva.
  - b) Sensor de peine: en realidad es una adaptación del anterior, pues la placa se sustituye por unos dedos metálicos que se interponen en el recorrido del grano limpio. Ambos sistemas pueden ser empleados también para forraje picado, situados al final del tubo deflector de descarga.
  - c) Sensor óptico: a los lados del canal de ascenso del producto recogido se sitúan unos emisores ópticos y unos detectores opuestos; la señal es proporcional al tiempo que

los haces luminosos son interceptados por el producto. Aunque este sensor se ha utilizado para grano, resulta mucho más ventajoso para el algodón.

- d) Sensor radiométrico: similar al anterior, se basa en emitir una radiación (rayos gamma) en el elevador de grano, y medir en el lado opuesto su atenuación debida a la absorción de energía que sufre el producto que cae a la tolva. Su posible peligrosidad para la salud humana y animal genera problemas legales de uso.
- e) Células de carga: en cosechadoras donde el producto se transporte mediante cintas transportadoras o superficies móviles, es común situar sensores de pesaje bajo las mismas, o bajo las tolvas directamente. También se emplean células de carga en el interior de sinfines elevadores de productos diversos en los que no existe una cosechadora instrumentada.
- f) Sensores de deformación y torsión: cuando el producto genera pequeños desplazamientos o torsiones de las superficies que los sostienen se pueden emplear sensores de microdeformación o de torsión, como es el caso de macroempacadoras que pueden llevar estos dispositivos bajo el final del canal de prensado.

2 Sensor de actividad del cabezal recolector, para detener la captura de datos al acabar una línea (Figura 57).



Figura 57. Sensor de actividad (altura) del cabezal situado bajo la cabina, sobre el canal de ascensión de mies

- 3 Sensor de anchura real de trabajo en el cabezal, para ajustar el cálculo de productividad superficial en el caso de que la cosechadora pueda usar menos que su anchura útil máxima, como en las de grano o en las segadoras-picadoras.
- 4 Sensor de humedad, normalmente de tipo capacitivo, para cuantificar el contenido en agua del producto cosechado y realizar correcciones de la productividad (Figura 58).
- 5 Antena para geoposicionamiento, ya sea mediante DGPS (con corrección diferencial) o RTK (corrección cinemática en tiempo real).
- 6 Sensor de velocidad real de avance: tradicionalmente se equipaba la cosechadora con un radar bajo en chasis, si bien hoy en día la precisión del GPS permite estimar la velocidad sin necesidad de este sensor.
- 7 Sensor de inclinación: el inclinómetro sirve para corregir los errores que comenten otros sensores (GPS, rendimiento, anchura, ...) cuando la cosechadora está en pendiente.
- 8 Sensores de calidad: dependiendo del cultivo medirán un parámetro u otro (color, contenido en proteína, pH contenido en azúcar –Figura 59–, ...); en general están en desarrollo y se basan en medidas químicas directas o estimaciones mediante otras tecnologías, como el infrarrojo.
- 9 Monitor de control y grabación de datos, bien sea con un sistema no estándar o bien con un terminal virtual (compatible con ISOBUS, Figura 60), que integre la señal de todos los sensores y la almacene, para poder representarla y estudiarla posteriormente.



Figura 58. Sensor de humedad del grano situado en el elevador de grano limpio a la tolva



Figura 59. Sobre vendimiadoras es posible instalar sensores de calidad del mosto (°Brix) como los de la figura (Barreiro, 2009)

## 7.2 Un buen resultado requiere una correcta calibración y mantenimiento

Para obtener un mapa con unos datos de calidad, representativos de la realidad en el campo, es imprescindible un buen mantenimiento de los sensores. Esto incluye dos aspectos: el mantenimiento en sí mismo, y la calibración.



Figura 60. Los monitores con tecnología ISOBUS pueden ser empleados en cosechadora o tractor, y controlar varios aperos

En cuanto al mantenimiento, en muchas ocasiones los manuales de uso no refieren el hecho de que estos sensores se desgastan, estropean o requieren unas

tareas similares al entretenimiento de cualquier máquina. Antes de comenzar la campaña es necesario revisar conexiones, limpiar de polvo y restos de cultivo los sensores, y comprobar la lubricación en caso necesario. En muchos casos, además es recomendable realizar una limpieza diaria de los sensores o, incluso antes de comenzar a recoger cada parcela, para los sensores más delicados (sensores de calidad). En conversaciones recientes con maquileros que llevan años trabajando con estos equipos instalados en cosechadoras de grano, la placa del sensor de impacto se desgastó hasta su rotura tras cosechar maíz y trigo durante 7-8 años (1.500 ha/año, unas 7.000 horas totales de uso). El coste de reposición de este sensor en la cosechadora de cereal puede ascender a 3.000-4.000 € dependiendo de marca y modelo.

La calibración es fundamental y en la práctica conlleva los siguientes pasos:

- a) Comprobar el funcionamiento del GPS: situar la antena sobre la cabina en posición centrada y más alta que la tolva, comprobar conexiones, comprobar que llega la corrección diferencial o la cinemática.
- b) Programar en el monitor la anchura de trabajo, si no disponemos de sensor de anchura real. Los sistemas actuales de autoguiado pueden facilitar este punto, como se comenta más adelante.
- c) Calibrar el inclinómetro, situando la cosechadora sobre una superficie perfectamente plana.
- d) Calibrar el sensor de humedad, normalmente determinando en campo la humedad y densidad del grano con un equipo portátil e introducir esos valores en el monitor.
- e) Calibrar el sensor de rendimiento: se puede hacer cosechando una zona homogénea de la finca, a velocidad y anchura de trabajo constantes, para después comparar el peso descargado de la tolva con la medida en báscula.
- f) Calibrar otros sensores: si disponemos de sensores de calidad, se pueden calibrar usando patrones conocidos (por ejemplo, agua) o midiendo con otro instrumento portátil, también calibrado, el parámetro a estimar.

g) Calibrar el retraso en la medida de los sensores: desde que el producto es cortado por el cabezal y entra en la cosechadora, hasta que realmente es medido por el sensor, pasa un cierto tiempo (“lag” en inglés) que depende de su movimiento por el interior de la máquina; este valor ha de ser estimado e introducido en el monitor.

### 7.3 Errores a corregir en el mapa de producción

Un agricultor avanzado o una empresa de servicios que haya empleado estos equipos sabe bien que para conseguir que los datos recogidos durante la cosecha sirvan para algo más que para hacer un “bonito mapa de colores” hay que trabajar sobre ellos, corregirlos y filtrar datos erróneos. En ocasiones los programas informáticos ofrecidos por las casas comerciales realizan parte de estas correcciones automáticamente, pero aún así el propietario debería supervisar el resultado y contrastarlo con lo que había realmente en campo.

Los errores más comunes que pueden aparecer en un mapa de producción superficial son:

- a) Retraso en la medida de los sensores: como se ha comentado antes, el “lag” influye en que la estimación del parámetro medido por un sensor se asigne al área correcta donde se cosechó el producto, o a otra unos metros después. En cosechadoras diversas, este valor puede oscilar entre 10 y 20 segundos (de 10 a 30 m de avance de la máquina), si bien es necesario cuantificarlo en cada caso para que se corrija automáticamente.
- b) Mezcla de cosecha de diferentes localizaciones: en cosechadoras con sistemas de retrilla o similares (con diferentes caminos dentro de la máquina), cierta cantidad de producto puede estar dando vueltas interiormente y mezclarse con lo recién cosechado. Es difícil corregir este hecho, pero en todo caso se recomienda ir monitorizando el sensor/avisador de retrilla correspondiente para poder tenerlo en cuenta después, a la vista del mapa.
- c) Variaciones de la anchura de trabajo: si no se dispone del sensor correspondiente, se pueden co-

meter errores de hasta el 10%; esto puede ser crítico en pasadas solapadas o de cierre.

- d) Variaciones en la velocidad de cosecha: cambios no controlados en la velocidad de avance pueden suponer errores en el cálculo de la superficie cosechada.
- e) Pérdidas de producto: los sensores sólo miden el producto que llega a la tolva, pero no el perdido; los detectores de pérdidas de las cosechadoras de cereal pueden servir para realizar mapas de la “calidad de trabajo del maquinista” o de la máquina.
- f) Pérdida de señal del GPS: lamentablemente no es imposible que durante el trabajo se pierda temporalmente la señal de los satélites, la corrección diferencial o ambas; poco se puede hacer en estos casos más que almacenar datos sobre totales cosechados, excepto en algunos sistemas de guiado que pueden estimar la trayectoria de la máquina sin necesidad de GPS.

### 7.4 Los costes de elaboración de mapas

Si bien se han hecho diversos estudios de costes y rentabilidad en todo el mundo (como el de R. Godwin en el Reino Unido, 2000) traemos aquí el presentado por los italianos B. Basso y colaboradores (2007), por ser más cercano a nuestras condiciones.

**Tabla 23. Ejemplo de programa de mantenimiento de una cosechadora de cereales.** (Basso y col. 2007)

Tarea	Tiempo total empleado (h)
<b>Calibración y limpieza de sensores</b>	
Sensor de inclinación	250
Sensor de caudal	100
Sensor de humedad	60-70
<b>Mantenimiento de los componentes</b>	
Programas	500
Receptor GPS	300
Monitor/terminal	10
<b>Reparación de los componentes</b>	
Sensor de inclinación	1.500-1.800
Sensor de caudal	1.500-1.800
Sensor de humedad	2.500
GPS	1.500

Para calcular el coste en el caso de la elaboración de mapas hay que tener en cuenta:

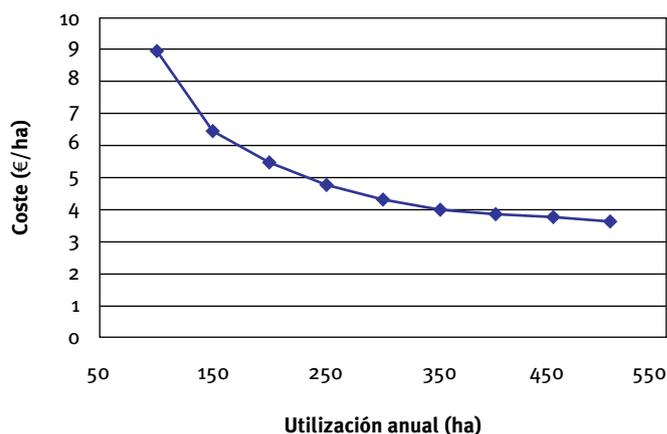
- **Adquisición:** el conjunto de sistemas necesarios para poder hacer mapas puede suponer un sobre-coste de un 3% en cosechadoras de cereal pequeñas, o estar incluido en el precio en las de gama alta.
- **Formación de los empleados:** contabilizando tanto el gasto en cursos de formación como el tiempo invertido, puede suponer un 10% del coste total.
- **Reparaciones:** en la Tabla 23 se muestra un ejemplo de costes de mantenimiento en una cosechadora de cereal.
- **Calibración y mantenimiento:** se ha estimado un 5% de la mano de obra necesaria para el mantenimiento habitual de la máquina (60-80 h/año).
- **Utilización:** debe comprender tanto el tiempo empleado en la toma de datos como el necesario para generar el mapa; en la Tabla 24 se indica un rango de uso anual entre 100 y 450 h/año, junto con otros parámetros empleados para calcular los costes de las Figura 61 y Figura 62.

**Tabla 24. Parámetros utilizados para calcular las curvas de costes de elaboración de mapas.** (Basso y col. 2007)

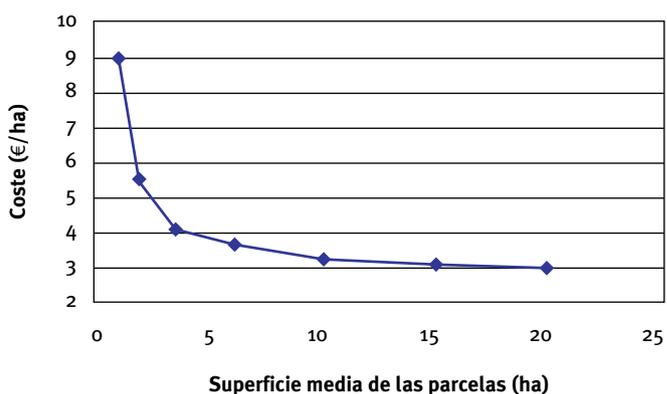
Parámetro	Valor asignado
Anchura de la barra de corte	7,2 m
Velocidad de avance	4-6 km/h
Rendimiento efectivo (*)	0,50-0,75
Vida útil	5 años
Capacidad de la tolva	10 t
Producción media	5-10 t/ha
Jornal de los operarios	11 €/h
Honorarios del responsable	12-20 €/h
Utilización anual	100-450 h/año
Superficie media de las parcelas	1-20 ha

\* El rendimiento efectivo es la relación entre el tiempo efectivo de trabajo y el tiempo total, y es un indicador de la organización de las tareas que intervienen en la recolección

**Figura 61. Evolución del coste de elaboración de mapas de producción al variar la superficie anual mapeada.** (Basso y col. 2007)



**Figura 62. Evolución del coste de elaboración de mapas de producción al variar el tamaño medio de las parcelas.** (Basso y col. 2007)



## 7.5 ¿Hay lugar para el ahorro?

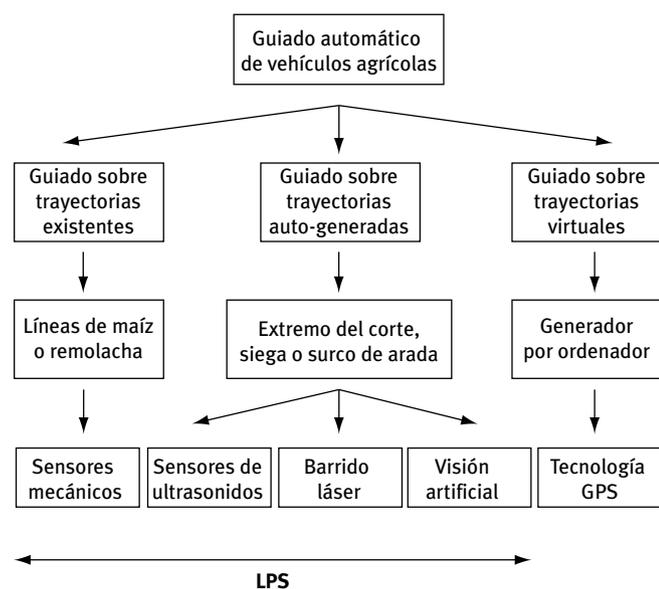
Varios de los componentes usados para hacer mapas (el monitor/terminal, el GPS) pueden ser desenganchados de la cosechadora y empleados en otras tareas a bordo del tractor o de otra cosechadora, con lo que sus horas de uso aumentarán y será más fácil amortizarlos.

Pero retomando la cuestión que planteábamos ¿es posible ahorrar costes empleando técnicas de agricultura de precisión en la cosecha? Una posibilidad actualmente son los sistemas de guiado. En otras labores agrícolas las ayudas al guiado o los sistemas de autoguiado, aparte de aumentar el confort del operario, permiten evitar solapamientos en pasadas consecutivas. En el caso de las cosechadoras,

además es significativo el mejor uso de la anchura máxima de trabajo de la máquina que se consigue, con lo que aumenta la capacidad de trabajo efectiva y disminuye el tiempo de cosecha. Diversos estudios cuantifican este ahorro en un 5-10%.

Los sistemas empleados para autoguiado de cosechadoras se resumen en la Figura 63. En general pueden ser de dos tipos: sistemas de posicionamiento global (GPS) o sistemas de posicionamiento local (LPS) que aprovechen características del cultivo o del terreno para definir la trayectoria. En cosechadoras de grano es frecuente emplear sensores en los extremos del cabezal (láser, de ultrasonido, etc.) para detectar el límite entre lo segado y no segado, y corregir la dirección para que el extremo de la plataforma se ajuste siempre a la anchura máxima. En cosechadoras de forraje se emplean cámaras o sensores de barrido para ir detectando los cordones de heno. En cosechadoras trabajando en líneas (por ejemplo, maíz) es tradicional el uso de palpadores mecánicos que van “tocando” partes recias del cultivo y ajustan la dirección.

**Figura 63. Tipos de sistemas de autoguiado en cosechadoras**



## 7.6 Un paso más en la eficiencia: la integración de señales y sistemas

Hoy en día las cosechadoras están dotadas de muchos más sistemas de control y sensores electrónicos, aparte del autoguiado. Además de todo el equipamiento para monitorización de los parámetros de funcionamiento del motor, las cosechadoras cuentan con sistemas de autonivelación del cabezal, de los órganos de trilla y separación, sensores de esfuerzo de sus componentes (cilindro trillador, cabezal de picado, elevadores, sacudidores, transmisiones, ejes diversos, ...), de regímenes de giro, sensores de pérdidas de grano, etc. (Figura 64).



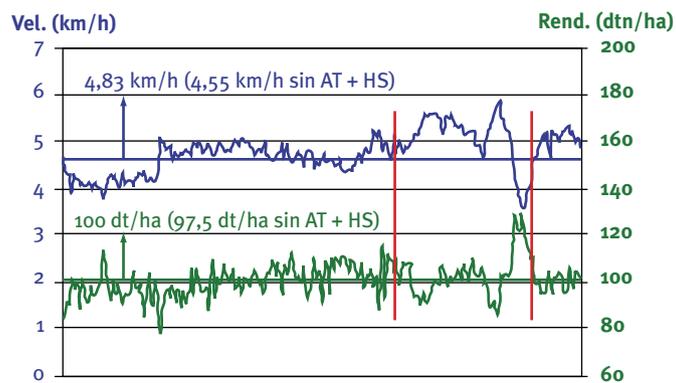
**Figura 64. Sensores de pérdidas de grano de una cosechadora con cilindro trillador axial (John Deere STS)**

Hace tiempo que los fabricantes se dieron cuenta que la integración de la información generada por todos estos sistemas podía conducir a un uso más “inteligente” de las máquinas, mejorando su eficiencia y permitiendo automatizar en gran medida su regulación durante la cosecha. Así, en algunos casos esto ya es una realidad y hay en el mercado cosechadoras que ofrecen sistemas capaces de monitorizar sobre la marcha la carga de trabajo de los órganos de cosecha (corte, trilla, separación, ...) y compararlos con la carga

del motor. En cada instante se comprueba si la máquina está desperdiciando capacidad de trabajo, y se aumenta la velocidad de avance para optimizar la cosecha. Si se detecta que la máquina está sobrecargada, se vuelve a disminuir automáticamente la velocidad de avance para superar el punto crítico (Figura 65). En un caso ideal de funcionamiento, el operario debería poder programar el sistema para elegir el criterio de optimización que prefiere: disminuir el consumo en gasóleo, disminuir el tiempo empleado en cosecha o disminuir las pérdidas de producto.

**Figura 65. Algunas cosechadoras actuales pueden disminuir automáticamente su velocidad de avance (línea azul) cuando detectan una mayor cantidad de producto (línea verde) en sus órganos de procesado.**

(Fuente: John Deere)



Según datos obtenidos por la Universidad de Weihenstephan (2006) con cosechadoras John Deere dotadas de los sistemas Autotrac y HarvestSmart, se consiguen aumentos de la capacidad de trabajo efectiva (t/ha) de un 23%, como se observa en la Tabla 25.

**Tabla 25. Resultados de una prueba de campo con cosechadoras John Deere con los sistemas Autotrac y HarvestSmart.** (Univ. de Weihenstephan, 2006)

Parámetro medido	Cosechadora con control manual	Sistema integrado (Autotrac + HarvestSmart)
Producción superficial del área cosechada (t/ha)	9,68	9,47
Tiempo de cosecha	01:13:47	00:48:01
Velocidad media (km/h)	4,29	5,01
Capacidad de trabajo efectiva (ha/h)	3,53	4,45
Aumento de capacidad de trabajo	-	26%
Aumento de capacidad de trabajo corrigiendo la producción		23%



## 8 Resumen en el uso de las principales técnicas de agricultura de precisión

---

Han sido ampliamente tratados en esta publicación tanto el sistema de “agricultura de precisión” propiamente dicho, como el sistema de guiado de vehículos agrícolas. No obstante, se describen aquí algunos de los aspectos que los definen de forma resumida, puesto que son sistemas perfectamente probados, aunque el primero de ellos poco extendido entre los agricultores españoles.

- El sistema tradicional de agricultura de precisión se basa y se inicia en la generación de los llamados mapas de cosecha o mapas de variabilidad espacial de la producción de cada cultivo en al menos dos o tres campañas para cada uno. Estos mapas son la expresión cartográfica resultante de un conjunto de datos tomados en la cosecha con sensores de producción (máscicos o volumétricos) y, en su caso, sensores de humedad de que dispone la cosechadora, y que son geo-referenciados con el empleo de un sistema de posicionamiento geográfico (GPS). En el caso de los cereales, la cosechadora asimismo puede estar dotada de un sensor de la anchura real de corte.

La sola disposición de estos documentos ya ofrece, a pesar del pequeño coste añadido que supone sobre el coste de la labor de cosechar, una herramienta de gran importancia para la toma de decisiones en relación con la explotación más eficiente de la parcela. La utilización de este instrumento podría ser la forma de que el sistema vaya entrando a formar parte de la información previa en las explotaciones a la toma de decisiones sobre rotaciones, fertilización, dosis de siembra, etc., de forma que podría constituir el embrión de la futura implantación del sistema.

En una segunda fase del mismo, la aplicación informática de soporte admite las correcciones que sugieran los resultados del análisis de las muestras de suelos (realizado la toma de muestras con la precisión que exija la parcela), y que podrían ser la causa de la variabilidad espacial en la parcela. En este sentido, es conveniente hacer alguna precisión sobre qué superficie mínima debería ser tenida en cuenta para definir cada recinto diferenciado en la parcela. Esta superficie no se puede definir sin conocer la parcela, sin saber el grado de exactitud que

se desea, habiéndose manifestado como bastante eficiente el empleo de equipos capaces de zonificar en base a la determinación de la conductividad eléctrica del suelo (Figura 66), e incluso el pH. Esta zonificación permite estimar a priori los recintos de parcela que deberían ser tenidos en cuenta por separado para decidir el plan de toma de muestras.

La operación de toma de muestras puede realizarse por el sistema habitual, manual, empleando azada y/o la barrena clásica. Pero cuando se trata de sistematizar esta operación existen equipos montados, por ejemplo, sobre vehículos ATV, que permiten hacer el trabajo de extracción de forma automatizada, geo-referenciándose a la vez el punto de toma con el empleo de un receptor GPS con el que va dotado el vehículo (Figura 67).



Figura 66. Sensor de conductividad eléctrica del suelo suspendido a los tres puntos del tractor



Figura 67. Un ATV dotado de dispositivo de toma de muestras de suelo

La tercera fase permite aplicar esta información de la variabilidad productiva corregida para poder hacer las aplicaciones de semilla y de fertilizantes en dosis pro-

porcionales a la producción corregida esperada, para lo cual, los aperos correspondientes deberán disponer de los dosificadores variables correspondientes.

En este sentido es conveniente citar la necesidad de que los aperos y máquinas estén dotados de equipos de dosificación variable. Son necesarios en “agricultura de precisión” pero también lo son en muchas de las aplicaciones que se van a describir más adelante. Igualmente es muy importante hacer notar que, en cualquier caso, es absolutamente imprescindible asegurar el buen funcionamiento de los equipos de aplicación (ajuste y calibrado), en aras de asegurar que hacen distribuciones uniformes y ello es especialmente necesario en el caso de abonadoras de proyección, así como en pulverizadores. Sin ello, de nada sirve ninguno de los sistemas que se suponen forman parte de la agricultura de precisión en su sentido más amplio.

El conjunto del sistema así definido sería consecuencia de una primera fase predictiva consistente en la generación de mapas, en este caso de producción, que derivará a posteriori en el resto de las fases descritas. Otras aplicaciones se van desarrollando, algunas ya en el mercado, para la ejecución de las operaciones en tiempo real (unos sensores captan la información y unos actuadores ejecutan la orden en un tiempo reducido según se hace la labor) y en esta línea es en la que más se investiga y se trabaja en la actualidad, tal como se verá más adelante. Por lo que se refiere al mapeado, se ha trabajado sobre todo hasta ahora en el estudio de la variabilidad en la producción, pero se puede mapear cualquier parámetro del suelo, del cultivo o incluso del consumo de combustible.

- Los sistemas de guiado funcionan básicamente con la disposición de receptores GPS que definen e informan sobre la posición del vehículo en cada momento y marcan la trayectoria a seguir en una labor determinada, debiendo fijarse en el sistema la distancia entre pasadas. El modo en que se realizan las correcciones para que la dirección se mantenga por el itinerario previsto, marca una clasificación previa de los equipos de guiado existentes:

- Con la ayuda de una barra de luces o con la de un monitor el conductor corrige a derecha o a izquierda para mantener al vehículo en su trayectoria prevista, constituyéndose así un sistema de guiado asistido.
- La integración del sistema GPS con la dirección del vehículo agrícola permite que las correcciones para mantener la dirección prevista se realicen de forma automática, con lo que tendremos el guiado autónomo.

Existen sistemas de guiado basados en el análisis de imagen, en los que la dirección se marca con el empleo de programas capaces de diferenciar entre el terreno tratado y el terreno sin tratar (corte de la cosecha, línea entre lo arado y lo sin arar, ...), siendo así esta línea la directriz del recorrido.

El guiado autónomo más clásico se entiende en las distintas pasadas, debiendo el usuario colocar el vehículo en el comienzo de cada una. Pero también es posible el guiado autónomo en trazados en redondo y en toda la superficie de la parcela.

Igualmente existen en el mercado tractores preparados para gestionar los cabeceros, de tal forma que una vez realizado el primer cabecero en cada extremo de la parcela, el procedimiento queda registrado en el ordenador de a bordo y el resto de los cabeceros se realiza automáticamente. Y este procedimiento se puede combinar con el guiado autónomo en las pasadas, con lo que se completaría casi en su totalidad la autonomía de guiado en toda la parcela.

- Existen además otras aplicaciones más o menos extendidas o aún en proceso de investigación y desarrollo o en proceso de diseño de prototipos, de las que se expone a continuación una referencia:

- En labores relacionadas con el manejo del suelo o con el análisis de sus propiedades pueden destacarse algunas aplicaciones de agricultura de precisión.

Con sensores de inducción electromagnética se determinan algunas propiedades del

suelo (capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica –ya citado más arriba–, pH, etc.), lo que permite reconocer previamente el suelo de la parcela o realizar una aplicación de fertilizante en tiempo real.

Con la utilización de sensores ópticos de luz visible o infrarroja dirigidos al suelo se pueden distinguir las plantas del terreno desnudo, lo que permite hacer aplicaciones de producto fitosanitario solamente allí donde aparecen malas hierbas.

Una aplicación de los sistemas de guiado se encuentra en equipos diseñados para realizar labores de aricado (eliminación mecánica de malas hierbas) entre surcos y entre plantas. En unos se utilizan programas que aplican algoritmos de análisis de imagen que hacen que determinadas piezas (rejas o púas) discurran entre las plantas eliminando las malas hierbas sin dañar al cultivo. Existen algunos equipos comercializados de gran interés para la agricultura ecológica (Figura 68).

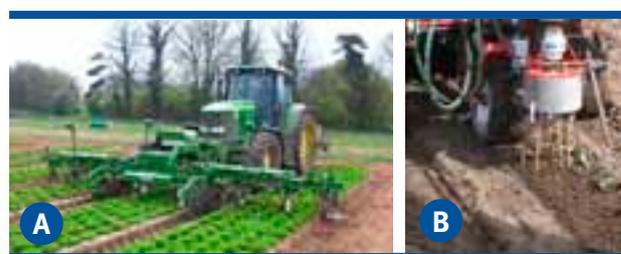


Figura 68. Equipos de aricado para eliminación de malas hierbas entre líneas modelo *Robocrop* de la marca británica *Gardford* (a) y entre líneas y entre plantas dentro del surco, prototipo diseñado por el *Center of Precision Farming* de Dinamarca (b)

Igualmente, en una segunda modalidad, existen cultivadores que ya se comercializan y que, una vez divididos en elementos autónomos de 6 ó 7 rejas, cada uno de estos módulos es dirigido por un sensor óptico que determina la posición de los surcos, obligando a las rejas a circular entre ellos (Figura 68 a).

- En equipos de aplicación de productos fitosanitarios existen un considerable número de aplicaciones de agricultura de precisión.

Ya se dispone de un casi infinito número de tipos de boquillas que permiten elegir la más adecuada en cada tipo de tratamiento, destacándose las que reducen la deriva (disponen de un orificio a través del cual se incorpora aire al flujo de caldo, generándose gotas más gruesas). En este sentido también se destacan los pulverizadores de barras de cortina de aire, así como en atomizadores y nebulizadores los dispositivos recuperadores. Y no se puede dejar de mencionar el principal elemento de estos equipos, las boquillas, sin destacar que todos los fabricantes ofrecen ya información sobre la distribución del tamaño de las gotas que genera cada modelo y tipo de boquilla a cada presión, lo que resulta ser un dato de gran importancia para garantizar un tratamiento de calidad y con una reducción de la deriva.

Las aplicaciones de agricultura de precisión en estos equipos son:

Disposición en los equipos arrastrados de sensores de medida de la velocidad de desplazamiento real de la máquina para adaptar el caudal repartido a dicha velocidad con el fin de mantener la dosis de caldo aplicada por hectárea.

Inyección directa de producto sobre el caudal de agua para poder variar la dosis de aplicación de producto fitosanitario sin variar la dosis de caldo.

Control de tramos: cada uno de los tramos de boquillas en los que se divide la anchura de aplicación puede ser abierto y cerrado alternativa y automáticamente para adaptar la dosis de caldo aplicado en cada momento a los requerimientos de la variación de la productividad espacial (“agricultura de precisión”) o a los datos de un mapa de rodales (SIG) previamente elaborado por análisis de imagen, por observaciones realizadas desde la cose-

chadora en la labor de recolección o por observaciones aéreas (teledetección, avionetas y/o aviones u otros equipos no tripulados).

Corrección automática de la altura de las barras por ultrasonidos generados por un emisor y recogidos por un sensor, midiéndose con la ayuda de ambos la posición relativa en relación con el suelo para actuar sobre un sistema hidráulico que las mantiene fijas, asegurándose una perfecta uniformidad en la aplicación.

En atomizadores, variación de las dosis de caldo aplicadas en función de la masa vegetal a la que se dirige el chorro de aire y producto fitosanitario, gracias a la presencia de un sistema de detección por ultrasonidos de dicha masa. En el caso de plantaciones en vaso, la aplicación se interrumpe en el trayecto entre árboles.



Figura 69. Motomáquina robotizada (“fitorobot”) para aplicación automática de productos fitosanitarios en invernaderos, de diseño andaluz y premiada en el certamen internacional UNACOMA Vision Event (cortesía de CADIA Ingeniería)

Existen máquinas robotizadas que se introducen en el interior de invernaderos (Figura 69) y pueden realizar su trabajo de pulverización de forma autónoma, recorriendo un trazado previamente establecido, sin necesidad de que el usuario tenga que permanecer en la atmósfera que se crea en el interior a causa del tratamiento.

En esta misma línea se trabaja en el diseño y desarrollo de micro-robots capaces de desplazarse de forma autónoma o dirigida a control remoto a lo largo y ancho de la parcela

con misiones relacionadas con la transmisión de información del estado del cultivo, presencia de plagas, enfermedades, etc., o presencia, e incluso eliminación, de malas hierbas (Figura 70).



Figura 70. Dos modelos de robots premiados en el certamen FieldRobot Event en dos de sus ediciones

Estos últimos equipos se basan, en general, en el empleo de técnicas de análisis de imagen, realizando el envío de datos o la aplicación de un producto fitosanitario en tiempo real. También existen diseños a mayor tamaño para ejecutar estas aplicaciones (Figura 71) que son capaces de aplicar dosis muy reducidas de herbicida (microlitros) exactamente sobre las hojas de la mala hierba, con lo que el ahorro de fitosanitario es enorme.

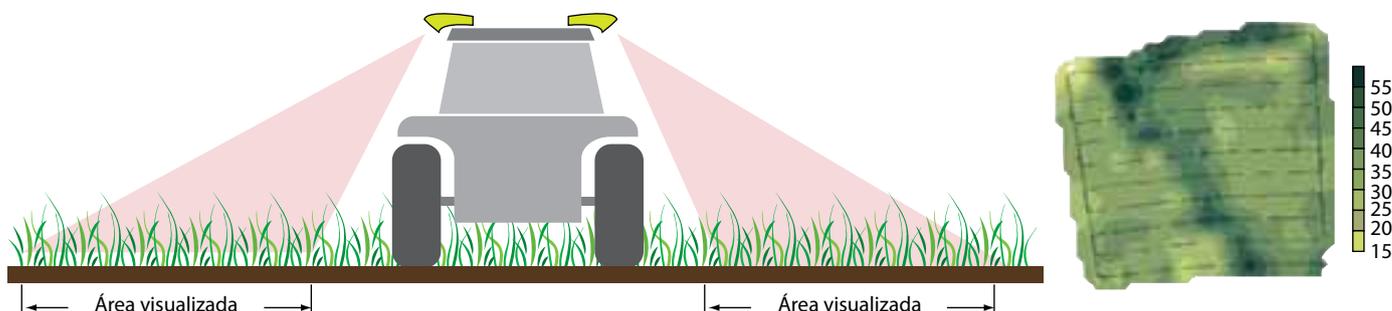


Figura 71. Equipo robotizado para la aplicación selectiva de herbicidas (Fuente: Universidad de Copenhague: Center for Precision Farming)

- En fertilización, dadas las grandes anchuras de trabajo que pueden ofrecer las abonadoras de proyección, es donde más aplicación tienen los sistemas de guiado, aun los menos precisos, pero también en esta labor pueden citarse algunas aplicaciones de agricultura de precisión.

Se pueden hacer aplicaciones de fertilizante, especialmente nitrogenado, con el empleo de equipos capaces de medir la reflectancia del cultivo (un sensor óptico analiza el estado vegetativo del cultivo), lo que permite la determinación del contenido de clorofila y en consecuencia deducir las necesidades de nitrógeno y, por tanto, la dosis de aplicación necesaria de fertilizante nitrogenado en tiempo real. También pueden generar un mapa indicativo del estado del cultivo (Figura 56 y Figura 72).

Figura 72. Esquema del modo de actuación de los sensores de reflectancia del cultivo y ejemplo de mapa suministrado por este sistema



## – Siembra y trasplante

La posición geográfica que ocupa cada semilla en sembradoras de precisión monograma puede determinarse con la disposición en la sembradora de un receptor GPS y de un sensor óptico en la bota de siembra. Lo mismo puede hacerse al colocar cada planta cuando se realiza una labor de trasplante con una trasplantadora. Así quedará determinada la posición de cada planta del cultivo, lo que podrá dar lugar a que, mediante el empleo de cámaras, cualquier planta detectada fuera de las posiciones preestablecidas para las plantas del cultivo, habrá de ser una mala hierba, con lo que se abre un camino hacia el empleo de técnicas de eliminación de dichas malas hierbas mediante el uso de sistemas de microinyección, entre otras posibles operaciones.

## – Control de flotas

Está cobrando una gran importancia la aplicación del control de flotas, un sistema ya habitual en equipos de movimiento de tierras, transporte de mercancías y de viajeros, a los parques de maquinaria agrícola (empresas de trabajo a terceros, cooperativas de maquinaria, plantas deshidratadoras,...).

Para desarrollar una aplicación de control de flotas hay que contar con una base cartográfica en un sistema de información geográfica (SIG), sistemas de comunicaciones y de posicionamiento y de adquisición de datos en máquinas, de tal forma que se podrá obtener datos de las mismas, tanto en tiempo real como para el análisis posterior y la toma de decisiones en la gestión. Así se puede disponer de datos sobre la ubicación de las máquinas en tiempo real, y su visualización sobre la cartografía en el centro de control, sus parámetros de funcionamiento (régimen del motor, velocidad de trabajo, etc.) y comportamiento general de la máquina. Se pueden

planificar y optimizar sus rutas y, a posteriori, hacer análisis de capacidades de trabajo y de costes, facilitar la trazabilidad, etc.

Existen programas en el mercado que pueden ser adaptados a las necesidades propias de cada flota y equipos técnicos capaces de elaborar diseños propios adaptados a las citadas necesidades.

Pero en el mercado existen aplicaciones parciales para el control de flotas. Como ejemplo puede citarse el sistema AGCOMAND de MF, que permite la grabación automática de datos de los tractores y máquinas trabajando en campo y su transmisión a un servidor, junto con fotografías, grabaciones de voz o notas de los supervisores y los operadores, utilizando ordenadores personales y teléfonos móviles.

### • Compatibilidad entre tractores y equipos

Un tema de gran importancia para poder hacer agricultura de precisión es el que tiene que ver con la compatibilidad entre tractores y aperos, y viceversa. Muy a menudo surgen problemas “de entendimiento” entre tractores y aperos en los que, siendo de distintos fabricantes, los protocolos en base a los cuales se diseñan sus programas para la generación de mapas y de aplicación proporcional, son distintos.

Los fabricantes trabajan en el sentido de mejorar esta situación, diseñando sus aplicaciones informáticas en base a los protocolos ISOBUS derivados de la norma ISO 11783, con un lenguaje común que permita el entendimiento.

### • Ajuste y calibrado de máquinas

No se puede terminar, hablando de agricultura de precisión, sin abordar este tema, ya que no es posible la AP sin máquinas perfectamente ajustadas y calibradas, en referencia a sembradoras, abonadoras y equipos de aplicación de fitosanitarios, tanto si se hacen aplicaciones proporcionales a la variabilidad espacial (mapas de producción, mapas de

malas hierbas, etc.) como si no. Los fabricantes deben garantizar el cumplimiento de las prestaciones de los equipos que fabrican y el agricultor debe conocer y disponer del manual de sus equipos cuando son nuevos, y estar seguro de que sus equipos en uso están ajustados y calibrados para conseguir aplicaciones que cumplan los requisitos de uniformidad en sus distribuciones.

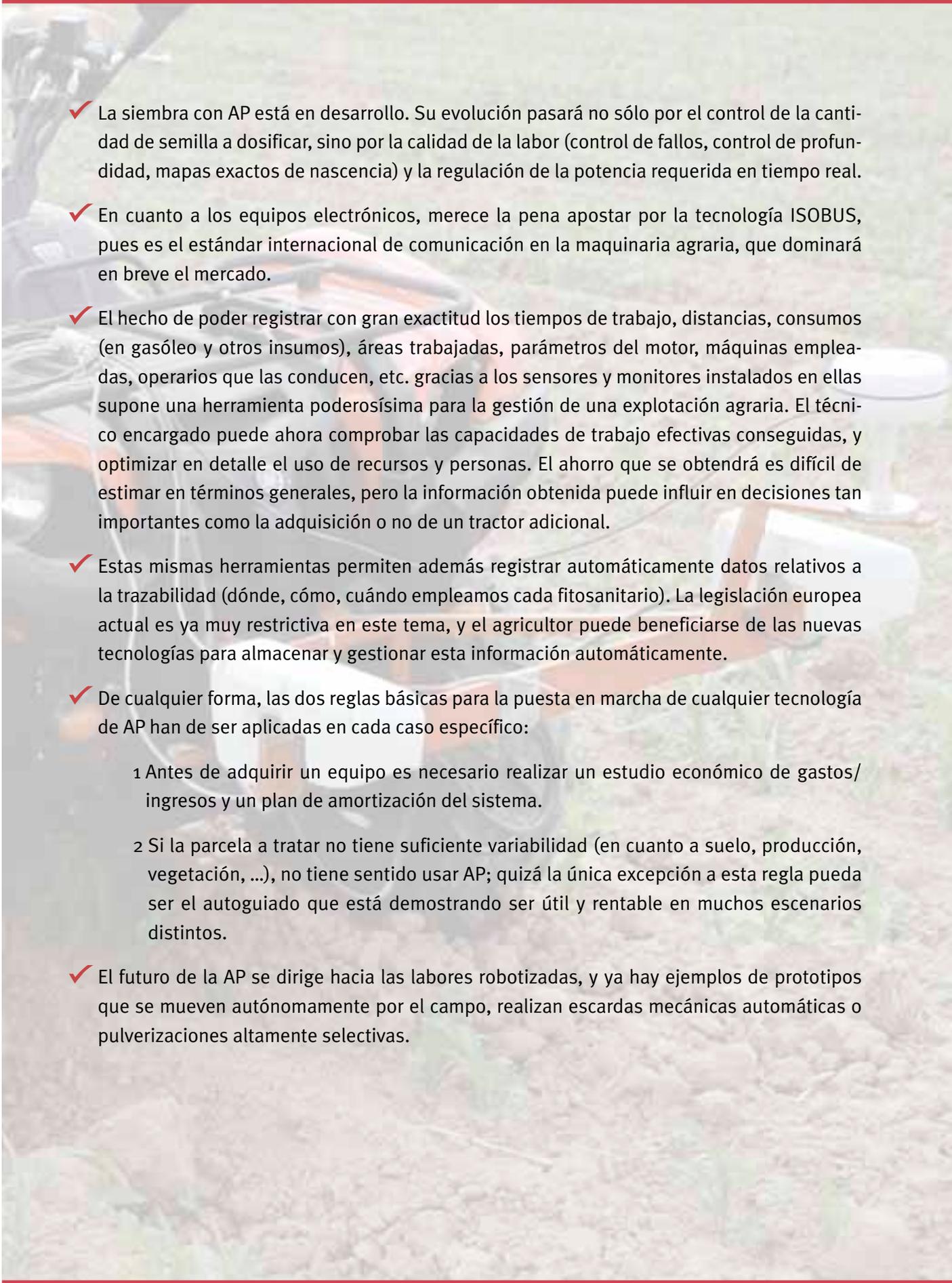
En España existen centros capaces de certificar estos ajustes y calibrados, que en la actualidad deben hacerse con carácter voluntario, pero que serán obligatorios a corto plazo (equipos de aplicación de pulverizadores, finales de 2016) o a medio plazo (abonadoras). Tal es el caso de la Estación de Ensayos de Abonadoras y Sembradoras de Palencia (para abonadoras) o del Centro de Mecanización Agraria de la Generalitat de Catalunya (pulverizadores), aunque, para estos equipos, serán varios los centros que comenzarán en breve a prestar servicios para este fin.



# REGLAS CLAVE

## Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura de Precisión

- ✓ La agricultura de precisión (AP) puede ayudar al agricultor a conseguir una mayor eficiencia productiva, a la vez que a reducir el impacto medioambiental.
- ✓ No se debe juzgar la utilidad de la AP sólo en términos de “reducción de costes”: puede proporcionar ventajas en cuanto a un mayor control de maquinaria-insumos, o mejor gestión de la información.
- ✓ El aumento de la rentabilidad agraria que se puede conseguir usando AP incluye factores fáciles de medir (mayor producción superficial en ciertas zonas, por ejemplo) y otros difícilmente cuantificables (menor repercusión en el ecosistema, mejora del confort del operario, mayor información de las condiciones del suelo/cultivo, etc.).
- ✓ El uso de sistemas de ayuda al guiado permite reducir el tiempo de trabajo, con el consiguiente ahorro de gasóleo.
- ✓ La situación actual de España en cuanto a la cobertura de “redes RTK” (GNSS) es excepcional, ya que es uno de los pocos países en los que los gobiernos autonómicos ofrecen el servicio gratuitamente. Sin embargo, la alta precisión que ofrece un RTK sólo es necesaria en ciertas labores (por ejemplo, siembra) y el agricultor debe estudiar alternativas que permitan el geoposicionamiento con equipos más económicos (por ejemplo, dGPS).
- ✓ Estrategias de control de tráfico en las parcelas (control de rodada) automatizadas mediante GPS o RTK permiten ahorros sustanciales en laboreo y, por tanto, en gasóleo.
- ✓ La creación de mapas del punto de funcionamiento del motor (régimen de giro, par) durante su trabajo en parcela permite optimizar el trabajo, disminuyendo también el consumo de combustible.
- ✓ La aplicación variable de herbicida resultará muy ventajosa frente a la dosificación uniforme tradicional si podemos permitirnos reducir la dosis en ciertas áreas de la parcela (o aplicar sólo allí donde hay rodales); es decir, si tenemos claro que habitualmente estamos aplicando en exceso, al menos en ciertas áreas.
- ✓ En el caso de abonado, la conclusión no es tan clara. En ocasiones, lo que aportaremos de menos con respecto a la aplicación uniforme en unas zonas puede verse compensado (incluso superado) por lo que aplicaremos de más en las otras.
- ✓ Los recientes sensores que estiman las características del suelo proporcionan herramientas para controlar con precisión y monitorizar sobre la marcha las variaciones de parámetros relacionados con la fertilidad.

- 
- ✓ La siembra con AP está en desarrollo. Su evolución pasará no sólo por el control de la cantidad de semilla a dosificar, sino por la calidad de la labor (control de fallos, control de profundidad, mapas exactos de nascencia) y la regulación de la potencia requerida en tiempo real.
  - ✓ En cuanto a los equipos electrónicos, merece la pena apostar por la tecnología ISOBUS, pues es el estándar internacional de comunicación en la maquinaria agraria, que dominará en breve el mercado.
  - ✓ El hecho de poder registrar con gran exactitud los tiempos de trabajo, distancias, consumos (en gasóleo y otros insumos), áreas trabajadas, parámetros del motor, máquinas empleadas, operarios que las conducen, etc. gracias a los sensores y monitores instalados en ellas supone una herramienta poderosísima para la gestión de una explotación agraria. El técnico encargado puede ahora comprobar las capacidades de trabajo efectivas conseguidas, y optimizar en detalle el uso de recursos y personas. El ahorro que se obtendrá es difícil de estimar en términos generales, pero la información obtenida puede influir en decisiones tan importantes como la adquisición o no de un tractor adicional.
  - ✓ Estas mismas herramientas permiten además registrar automáticamente datos relativos a la trazabilidad (dónde, cómo, cuándo empleamos cada fitosanitario). La legislación europea actual es ya muy restrictiva en este tema, y el agricultor puede beneficiarse de las nuevas tecnologías para almacenar y gestionar esta información automáticamente.
  - ✓ De cualquier forma, las dos reglas básicas para la puesta en marcha de cualquier tecnología de AP han de ser aplicadas en cada caso específico:
    - 1 Antes de adquirir un equipo es necesario realizar un estudio económico de gastos/ingresos y un plan de amortización del sistema.
    - 2 Si la parcela a tratar no tiene suficiente variabilidad (en cuanto a suelo, producción, vegetación, ...), no tiene sentido usar AP; quizá la única excepción a esta regla pueda ser el autoguiado que está demostrando ser útil y rentable en muchos escenarios distintos.
  - ✓ El futuro de la AP se dirige hacia las labores robotizadas, y ya hay ejemplos de prototipos que se mueven autónomamente por el campo, realizan escardas mecánicas automáticas o pulverizaciones altamente selectivas.

- ALCALÁ, A.R. y LUQUE, J.M. “*Farming mapping using the global positioning system (GPS)*”. International Conference on Agricultural Engineering (AgEng96), Madrid (España). 1996.
- ARÁN, M., BALLESTA, A. y VILLAR, P. “*Influencia de la variabilidad del suelo en la agricultura de precisión*”. Vida Rural, 109: 30-35. 2000.
- AUERHAMMER, H. y SCHUELLER, J.K. “*Precision farming. In: CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Vol. III - Plant Production Engineering*”. CIGR-ASAE. 1999.
- BERNAT, C. “*La agricultura de precisión: De la teoría a la aplicación real*”. Vida Rural, 109: 27-29. 2000.
- CAMPO, M. “*Agricultura de precisión: ¿Utopía o realidad?*”. Terralia, 16: 14-21. 2000.
- COOK, S.E., ADAMS, M.L. y CORNER R.J. “*On-Farming experimentation to determine site-specific responses to variable inputs*”. Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture, St. Paul, Minnesota (EEUU). 1999.
- CRUVINEL, P.E. “*Development of sensors for precision farming*”. 2<sup>º</sup> Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão, Viçosa - MG (Brasil). 2002.
- ESCRIBANO, C. “*Agricultura de precisión y teledetección: Aparición en España*”. Vida Rural, 109: 38-39. 2000.
- ESS, D.R., MORGAN, M.T. y PARSONS, S.D. “*Implementing Site-Specific Management: Map versus Sensor-Based Variable Rate Application*”. School of Agriculture, Purdue University (EEUU). 2000.
- GIL, E. “*Viticultura de precisión: Aplicación modular de fitosanitarios en viña*”. Vida Rural, 109: 44-46. 2000.
- GIL, E. “*Situación actual y posibilidades de la agricultura de precisión*”. In: Perspectivas de la Agricultura de Precisión en las Condiciones del Clima Mediterráneo. XXIX Conferencia Internacional de

- Mecanización Agraria (CIMA 2001), Zaragoza (España). 2001.
- GODWIN, R.J. “Cumulative mass determination for yield maps of non-grain crops”. *Computers and Electronics in Agriculture*, 23: 85-101. 1999.
  - HAGUE, T. “Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles”. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25: 11-28. 2000.
  - JOHANNSEN, C.J. y CARTER, P.G. “Spectral properties for site specific management”. 2º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão, Viçosa - MG (Brasil). 2002.
  - LAMBERT, D. y LOWENBERG-DEBOER, J. “Precision Agriculture Profitability: A Review”. School of Agriculture, Purdue University (EEUU). 2000.
  - LÓPEZ-CUERVO, S. “Sistemas GPS en agricultura de precisión”. In: *La Ingeniería Rural para un Desarrollo Agrario compatible con el Ambiente*. Actas del Simposio Internacional de Ingeniería Rural, Palencia (España). 2005.
  - LUND, I. “Sprayer nozzles for precision pesticide application”. International Conference on Agricultural Engineering (AgEngoo), Warwick (UK). 2000.
  - MARÇAL, D., LUIS, P. y ALVÉS, C.M. “Modelagem aplicada à agricultura de precisão”. 2º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão, Viçosa - MG (Brasil). 2002.
  - MATEO, J.M. “La respuesta del cultivo a una gestión diferencial”. In: *Perspectivas de la Agricultura de Precisión en las Condiciones del Clima Mediterráneo*. XXIX Conferencia Internacional de Mecanización Agraria (CIMA 2001), Zaragoza (España). 2001.
  - MESA, J. “Cosechadoras de cereales y mapas de rendimiento”. *Vida Rural*, 109: 40-42. 2000.
  - NICK, D. y TILLET, A. “A field assessment of a potential method for weed and crop mapping on the basis of crop planting geometry”. *Computer and Electronics in Agriculture*, 32: 229-246. 2001.
  - REID, J.F. “Technical advances in navigation systems for precision agriculture”. 2º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão, Viçosa - MG (Brasil). 2002.
  - ROBERT, P.C. “The economical feasibility of precision agriculture”. 2º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão, Viçosa - MG (Brasil). 2002.
  - RUNGE, E.C.A. y HONS, F.M. “Precision agriculture: Development of a hierarchy of variables influencing crop yields”. Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture, St. Paul, Minnesota (EEUU). 1999.
  - SANZ, A. y ZARCO, P. “Aproximación al Estado de la Tecnología en la Agricultura de Precisión”. Itagra. ct, Centro Tecnológico Agrario y Alimentario, Palencia (España). 2002.
  - SNAUWAERT, P. “Stratégies d’innovation en matière de machinisme agricole et prevision pour le proche avenir”. In: *Face aux Enjeux Européens, Quelles Stratégies de Mécanisation?*. CEMAGREF editions, Paris (Francia). 2001.
  - STAFFORD, J.V. y BOLAM, H.C. “Improving reliability of position resolution using GPS for precision agriculture”. International Conference on Agricultural Engineering (AgEng96), Madrid (España). 1996.
  - STAFFORD, J.V. “Implementing precision agriculture in the 21st century”. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76: 267-275. 2000.
  - THOMAS, M.R. “NASA’s Agricultural Program: A USDA/Grower Partnership”. 2º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão, Viçosa - MG (Brasil). 2002.
  - TIAN, L. “Machine vision-based precision farming systems”. 2º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão, Viçosa - MG (Brasil). 2002.
  - TISSEYRE, B., PAOLI, J.N., SACCA, A., TOTAL J. y SEVILA F. “DGPS correction based on a map algorithm for accurate machine location in the vineyard”. International Conference on Agricultural Engineering (AgEng98), Oslo (Noruega). 1998.

- URBANO, P. “*Fitotecnia: Ingeniería de la Producción Vegetal*”. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 2002.
- YANG, C.A. “*A variable rate applicator for controlling rates of two liquid fertilizers*”. *Applied Engineering in Agriculture*, 17 (3): 409-417. 2001.
- WANG, N. “*Design of an optical leaf sensor using plant spectral characteristics*”. *Transactions of the ASAE*, 44(2): 409-419. 2001.
- PAJARES MARTINSANZ, G. y CRUZ GARCÍA, J.M. “*Visión por computador: imágenes digitales y aplicaciones*”. Ra-Ma, Madrid, 2001.
- PINILLA RUIZ, C., “*Elementos de teledetección*”. Ra-Ma, Madrid, 1995.
- PRADOS, M. J., “*Teledetección, agricultura y medio ambiente: el empleo de imágenes Landsat-5 en el seguimiento y evaluación estadística de los regadíos en la cuenca baja del Guadalquivir*”. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, 1995.

## GPS

- Leica Geosystems. Available at <http://www.leica-geosystems.com>. Last accessed 1/2010
- VALERO, C. “*Avances en las tecnologías GPS: las redes RTK*”. *Vida Rural* 293 (Dossier Agricultura de Precisión): 44-48. 2009.
- ZUMBERGE, J.F. y GENDT, G. “*The demise of Selective Availability and implications for the international GPS service*”. *Physics and Chemistry of the Earth*. 26(6-8):637-644. 2001.

## Visión artificial y teledetección

- ALVES MOREIRA, M. “*Fundamentos do sensoria-mento remoto e metodologias de aplicação. 2ª ed.*”, Universidad Federal de Viçosa, Viçosa - MG (Brasil), 2003.
- ESCALERA HUESO, A. D. L. “*Visión por computador: fundamentos y métodos*”. Prentice-Hall, Madrid etc., 2001.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. “*Introducción a la fotointerpretación*”. Ariel, Barcelona, 2000.
- GONZÁLEZ, R. C. y WOODS, R. E. “*Digital image processing. 2nd ed.*”. Prentice-Hall, Upper Saddle River NJ, 2002.
- JAIN, A. K. “*Fundamentals of digital image processing*”. Prentice-Hall, Englewood Cliffs New Jersey, 1989.

## Ahorro de combustible en el tractor

- ANTANAS JUOSTAS y JANULEVICIUS, A. “*Evaluating working quality of tractors by their harmful impact on the environment*”. *Journal of environmental engineering and landscape management* 2009 17(2): 106–113. 2009.
- AZMI YAHYA, ZOHADIE, M., KHEIRALLA, A.F. GIEW, S.K. y BOON, N.E. “*Mapping system for tractor-imple-ment performance*”. *Computers and electronics in agriculture*. 2009 69: 2-11. 2009.
- LINDGREN, M. y HANSSON, P.A. “*Effects Of Engine Control Strategies And Transmission Characteristis On The Exhaust Gas Emission From An Agricultural Tractor*”. *Biosystem Engineering*. 2002 83(1): 55-65. 2009.
- SERRANO, J.M., PECA, J.O., MARQUES DA SILVA, J., PINHEIRO, A. y CARVALHO, M. “*Tractor energy requirements in disc harrow systems*”. *Biosystem engineering* 2007 98: 286-296. 2007.

## Control de rodada (CTF)

- BRIGHT, F.A. y MURRAY, S.T., “*Economic Viability of Controlled Traffic Farming. The Institution of Engineers Australia*”. Conference of Agricultural Engineering, Toowoomba Queensland, Australia, 15-18. 1990.

- CHAMEN, W.T.C., VERMEULEN, D.G., CAMPBELL, D.J., SOMMER, C. y PERDOK, U.D. “*Reduction of traffic-induced compaction*”. In: Proceedings of the ISTRO 11, vol. 1, Edinburgh, 227-232. 1988.
- MASEK, J., KROULIK, M. y KUMHALA, F. “*Benefits of Controlled Traffic Farming*”. Engineering for Rural Development, 28, 54-58. 2009.
- MCHUGH, A.D., TULLBERG J.N. y FREEBAIRN, D. “*Effect of field traffic removal on hydraulic conductivity and plant available water*”. Proceedings CD, ISTRO 16, Brisbane, pp. 717-723. 2003.
- TAYLOR, J.H. “*Controlled traffic: A soli compactation management concept*”. Trans. ASAE, 95: 1090-1098. 1986.
- TAYLOR, J.H. “*Development and Benefits of Vehicle Gantries and Controlled-Traffic Systems*”. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.). Soil Compaction in Crop Production. Elsevier, The Netherlands, Chapter 22: 521-537. 1994.
- TULLBERG, J.N. y MURRAY, S.T. “*Controlled traffic tillage and planting*”. Farm Mechanization Centre, Qld. Agric. College, Lawes, Qld, Australia, Report to the National Energy Research Development and Demonstration Council, Canberra, Australia. 1987.
- TULLBERG, J.N. “*Traffic effects on tillage draught*”. J. Agric. Eng. Res. 75(4), 375-382. 2000.
- TULLBERG, J.N., YULE, D.F. y MC GARRY, D., “*Driving a revolution in the paddock*”. ECOS 118, 28-30. 2004.
- TULLBERG, J.N., YULE, D.F. y MC GARRY, D. “*Controlled traffic farming – From research to adoption in Australia*”. Soil & Tillage Research, 97, 272-281. 2007.
- VERMEULEN, G.D. y MOSQUERA, J., “*Soil, crop and emission responses to seasonal-controlled traffic in organic vegetable farming on loam soil*”. Soil & Tillage Research, 102, 126-134. 2009.

## Control de malas hierbas y pulverización

- ANDUJAR, D., RIBEIRO, A., FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C. y DORADO, J. “*Assessment of a ground-based weed mapping system in maize*”. In: Proceedings of Precision agriculture’09, (eds. JV Stafford) pp. 355–362 Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic Publishers. 2009.
- BARROSO, J., FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C., MAXWELL, B.D. y REW, IJ. “*Simulating the effects of weed spatial pattern and resolution of mapping and spraying on economics of site-specific management*”. Weed Research 44, 460–468. 2004.
- CARDINA, J., JOHNSON, G.A. y SPARROW, D.H. “*The Nature and Consequence of Weed Spatial Distribution*”. Weed Science 45, 364–373. 1997.
- FAECHNER, T., NORRENA, K., THOMAS, A.G. y DEUTSCH, C.V. “*A Risk-Qualified Approach to Calculate Locally Varying Herbicide Application Rates*”. Weed Research 42, 476–485. 2002.
- GERHARDS, R., SÖJEFEKD, M., TUNNERNABB, C. y KUHBAUCH, W. “*Site-specific weed control in maize, sugar beet, winter wheat and winter barley*”. Precision Agriculture 3, 25–35. 2002.
- GERHARDS, R. y OEBEL, H. “*Practical experiences with a system for site-specific weed control in arable crops using real-time image analysis and GPS-controlled patch spraying*”. Weed Research 46, 185–193. 2006.
- LAMB, D.W. y BROWN, R.B. “*Remote-sensing and mapping of weeds in crops*”. Journal of Agricultural Engineering Research 78, 117–125. 2001.
- LUSCHEI, E.C., VAN WYCHEN, L.R., MAXWELL, B.D., BUSSAN, A.J., BUSCHENA, D. y GOODMAN, D. “*Implementing and conducting on-farm weed research with the use of GPS*”. Weed Science 49, 536–542. 2001.

- MARTÍN, P., BARRETO, L., RIAÑO, D., VAUGHAM, P. y FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C. “Assessing the potential of hyperspectral remote sensing for the discrimination of grassweeds in winter cereal crops”. *International Journal of Remote Sensing* (in press). 2010.
- PAICE, M., DAY, W., REW, L.J. y HOWARD, A. “A stochastic simulation model for evaluating the concept of patch spraying”. *Weed Research* 38, 373–378. 1998.
- RUEDA, V.P. y GERHARDS, R. “Selectivity of weed harrowing with sensor technology in cereals in Germany”. In: *Proceedings of Precision agriculture’09*, (eds. JV Stafford) pp. 339–348 Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic Publishers. 2009.
- TIMMERMANN, C., GERHARDS, R. y KUEHBAUCH, W. “The economic impact of the site specific weed control”. *Precision Agriculture* 4, 241–252. 2003.
- ZHANG, Z.H., WEAVER, S.E. Y HAMILL, A.S. “Risks and reliability of using herbicides at below-labeled rates”. *Weed Technology* 14, 106–115. 2000.
- BOGIOVANNI, R y LOWENBERG-DE BOER, J. “Economics of variable-rate lime in Indiana, in *Precision Agriculture*”. P.C. Robert R.H. Rust and W.E. Larson eds., ASA/CSSA/SSA, Madison, Wisconsin.
- CHRISTY, C. “Real-time measurement of soil attributes using on the go near infrared reflectance spectroscopy.” *Computers and electronics in agriculture*, doi:10.1016/J.COMPAG.2007.08.003. 2007.
- CORWIN, D.L. y LESCH, S.M. “Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture”. *Computers and electronics in agriculture* 46:11-43. 2005.
- GIL, E. “Situación actual y posibilidades de la agricultura de precisión”. Escuela Superior de Agricultura de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya. 2002.
- LOWENBERG-DE BOER, J., ERICKSON, K. y VOGEL, K.A. “Precision Farming Profitability”. *Agricultural Research Programs*. Purdue University. 2000.
- SETHURAMASAMYRAJA, B., ADAMCHUK, V.I., DOBERMANN, A., MARX, D.B., JONES, D.D. y MEYER, G.E. “Agitated soil measurements method for integrated on the go mapping of soil pH, potassium and nitrate contents”. *Computers and electronics in agriculture*. doi:10.1016/J.COMPAG.2007.02.010). 2007.
- SUDDUTH, K.A., CHUNG, S-O., ANDRADE-SÁNCHEZ, P y UPADHYAYA, S.K. “Field comparison of two prototype soil strength profile sensors”. *Computers and electronics in agriculture*, doi:10.1016/J.COMPAG.2007.11.006. 2007.

## Abonado y fertilidad del suelo

- ADAMCHUK, V. I., HUMMEL, J.W. y MORGAN, M.T. “On-the go soil sensors for precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*”. 44:71-91. 2004.
- AKRIDGE, J. y WHIPKER, L. “2000 Precision agricultural services and enhanced seed dealership survey results”. Staff paper n. 00-04 Center for Agricultural Business, Purdue University. 2000.
- BARREIRO ELORZA, P. “Sensores para la caracterización del suelo agrícola usados en agricultura de precisión.” *Vida rural*(260): 38-42. 2007.
- BASSO, B., SARTORI, L., BERTOCCO, M., GIL SIERRA, J. y SECO REMESESES, A. “Manual de Agricultura de Precisión. Conceptos teóricos y aplicaciones prácticas”. Editorial Eumedia. 2007.

## Siembra

- Páginas web de GEONICS, GEOCARTA y VERIS.
- CANAKCI, M., KARAYEL, D., TOPAKCI, M. y KOC, A. “Performance of a No-Till Seeder Under Dry and Wet Soil Conditions”. *Applied Engineering in Agriculture* 25:459-465. 2009.

- KARAYEL, D. y ÄZMERZI, A. “*Evaluation of Three Depth-Control Components on Seed Placement Accuracy and Emergence for a Precision Planter*”. *Applied Engineering in Agriculture* 24:271-276. 2008.
- MARLOWE EDGAR CORTES, B., TAKASHI, K., HIROSHI, O. y YOICHI, S. Active Seed Depth Control for No-tillage Systems. 2009 Reno, Nevada, June 21 - June 24, 2009. 2009.
- SCARLETT, A.J. “*Integrated control of agricultural tractors and implements: a review of potential opportunities relating to cultivation and crop establishment machinery*”. *Computers and Electronics in Agriculture* 30 (2001) 167–191. 2001.
- [www.aams-iberica.com](http://www.aams-iberica.com)
- [www.agriculturadeprecision.org](http://www.agriculturadeprecision.org)
- [www.cpf.life.ku.dk](http://www.cpf.life.ku.dk)
- [www.fieldrobot.nl](http://www.fieldrobot.nl)
- [www.vision-event.de](http://www.vision-event.de)
- [www.agriculturadeprecision.org](http://www.agriculturadeprecision.org)
- [www.agroguia.com](http://www.agroguia.com)
- [www.deere.com](http://www.deere.com)
- [www.fieldstar.com](http://www.fieldstar.com)
- [www.inlandgeo.es](http://www.inlandgeo.es)
- [www.infonortetecnologia.com](http://www.infonortetecnologia.com)

## Cosecha

- BARREIRO ELORZA, P. “*De la vendimia mecanizada a la mecanización total del viñedo*”. *Vida rural* (297): 50-56. 2009.
- BASSO, B., SARTORI, L., BERTOCCO, M., GIL SIERRA, J. y SECO REMESESES, A. “*Manual de Agricultura de Precisión. Conceptos teóricos y aplicaciones prácticas*”. Editorial Eumedia. 2007.
- WIESEHOFF, M y FERNÁNDEZ SORIANO, J. “*Leistungssteigerung durch automatische Durchsatzregelung und Parallelführung beim Mähdrusch*”. *LandTechnik* 61(6): 376-377. 2006.
- [www.isobus.net](http://www.isobus.net)
- [www.teejet.com](http://www.teejet.com)
- [www.topcon.com](http://www.topcon.com)
- [www.trimble.com](http://www.trimble.com)

## Recomendaciones finales

- BASSO, B. *et als.* coordinación edición española de GIL SIERRA, J. y SECO REMESESES, A. “*Manual de Agricultura de Precisión. Conceptos teóricos y aplicaciones prácticas*”. Ed. Eumedia. 2007.
- BOTO FIDALGO, J.A. *et als.* “*La mecanización agraria. Principios y aplicaciones*”. Universidad de León. 2006.
- GIL MOYA, E. “*Estado actual de la agricultura de precisión*”. Escuela Superior de Agricultura de Barcelona. Universidad Politécnica de Catalunya. 2007.



Títulos publicados de la serie  
*Ahorro y Eficiencia Energética  
en la Agricultura:*

---

Nº Especial: *Consumos Energéticos en las Operaciones Agrícolas en España.* 2005

Tríptico promocional: *Medidas de Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura.* 2005

Nº 1: *Ahorro de Combustible en el Tractor Agrícola.* 2005

Nº 2: *Ahorro y Eficiencia Energética en Agricultura de Regadío.* 2005

Nº 3: *Ahorro y Eficiencia Energética en Instalaciones Ganaderas.* 2005

Nº 4: *Ahorro, Eficiencia Energética y Sistemas de Laboreo Agrícola.* 2006

Nº 5: *Ahorro, Eficiencia Energética y Estructura de la Explotación Agrícola.* 2006

Nº 6: *Ahorro, Eficiencia Energética y Fertilización Nitrogenada.* 2007

Nº 7: *Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos.* 2008

Nº 8: *Protocolo de Auditoría Energética en Invernaderos. Auditoría energética de un invernadero para cultivo de flor cortada en Mendigorriá.* 2008

Nº 9: *Ahorro y Eficiencia Energética en las Comunidades de Regantes.* 2008

Nº 10: *Protocolo de Auditoría Energética en Comunidades de Regantes.* 2008

Nº 11: *Ahorro y Eficiencia Energética en los Cultivos Energéticos y Agricultura.* 2009

Nº 12: *Ahorro y Eficiencia Energética con Agricultura de Conservación.* 2009

Nº 13: *Ahorro y Eficiencia Energética en Buques de Pesca.* 2009

Nº 14: *Auditorías Energéticas en Instalaciones Ganaderas. Parte 1: Manual para la realización de auditorías energéticas en instalaciones ganaderas.* 2010

Nº 15: *Auditorías Energéticas en Instalaciones Ganaderas. Parte 2: Protocolo para la realización de auditorías energéticas en instalaciones ganaderas y ejemplos de auditorías en cuatro instalaciones.* 2010

Nº 16: *Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura de Precisión.* 2010





**IDAE** Instituto para la  
Diversificación y  
Ahorro de la Energía

c/ Madera, 8 - 28004 Madrid  
Tel.: 91 456 49 00. Fax: 91 523 04 14  
comunicacion@idae.es  
www.idae.es



P.V.P.: 8 € (IVA incluido)