

Uso de máquinas pequeñas autónomas e inteligentes o sistemas robóticos para el control de malas hierbas

Escarda selectiva, una nueva estrategia para el control de las malas hierbas

Este artículo presenta los resultados de un TFC (Trabajo Fin de Carrera) desarrollado en la Faculty of Life Sciences, de Copenhague. El propósito de este proyecto es describir una nueva estrategia para el control de la flora arvense, basado en la selección y tratamiento de las malas hierbas "dañinas" presentes en el campo, manteniendo la biodiversidad. Esta nueva estrategia se denomina escarda selectiva, mediante procedimientos de visión artificial, de identificación de áreas de trabajo, de tratamiento de escarda y su mapeado.

Estrategias empleadas

Desde el punto de vista de la protección del cultivo, el manejo del escardado tiene tres finalidades principales (Mohler *et al.*, 2007):

1. Reducir la densidad de la mala hierba hasta alcanzar niveles tolerables. Los estudios experimentales demuestran que la relación entre la pérdida de producción del cultivo y la densidad de la mala hierba cobra forma de una hipérbola rectangular (Chikoye *et al.*, 1995, **figura 1**).

Miguel Garrido Izard¹, Pilar Barreiro Elorza¹
y Hans W. Griepentrog².

¹ Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos,
Universidad Politécnica de Madrid.

² Faculty of Life Sciences. Copenhague, Dinamarca.

Normalmente, las malas hierbas son consideradas ajenas e indeseadas dentro de los agroecosistemas. Pero las malas hierbas también deberían ser vistas como componentes del agroecosistema que proporcionan servicios que complementan los obtenidos por el cultivo. Por esta razón es importante repensar la necesidad de eliminar todas las malas hierbas existentes en el campo. Con la posibilidad de tratar individualmente las malas hierbas abrimos la posibilidad de elegir la mejor estrategia, que facilite la integración de una elevada productividad del cultivo y el respeto al medio ambiente.



2. Reducir los daños producidos por una especie determinada de mala hierba en un cultivo asociado. No sólo con la reducción de la densidad de la mala hierba se pueden limitar los efectos negativos de éstas en el cultivo, también reduciendo el consumo de recursos, crecimiento, en resumen, la capacidad competitiva de cada mala hierba viva (Mortensen *et al.*, 1998). Esto quiere decir que hay que colocar a la mala hierba en una situación de debilidad, pero no necesariamente de muerte.

3. Modificar la composición de la comunidad de malas hierbas hacia niveles menos agresivos. Las malas hierbas producen diferentes grados de daño en los cultivos, dependiendo de la especie de mala hierba y del grado de dificultad que impongan en el manejo del cultivo y en la cosecha (figura 1).

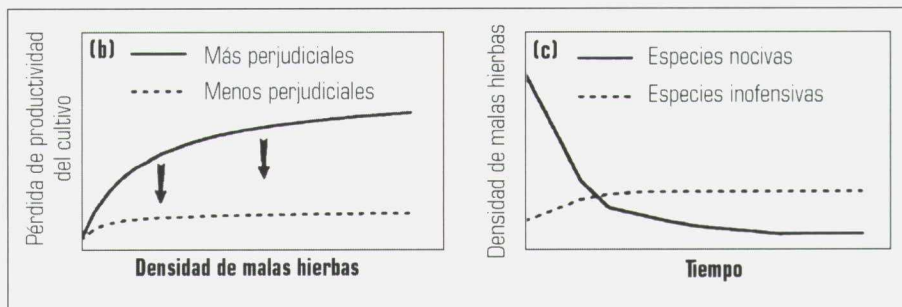
Por lo general, las malas hierbas se presentan de manera heterogénea en los campos cultivados, distribuyéndose en rodales de densidad variable y forma diferente. Como norma general, las especies perennes forman rodales bien definidos y estables en el tiempo, como consecuencia de su sistema de reproducción fundamentalmente vegetativo. En cambio, las especies anuales suelen presentarse de forma más aleatoria debido a su capacidad de dispersión por semillas (Andujar, 2009).

La persistencia de los rodales está condicionada fundamentalmente por la densidad de plantas. A medida que aumenta la densidad dentro del rodal, la emergencia de plántulas es mayor, así como la resistencia a tratamientos herbicidas, circunstancias que permiten perpetuar el rodal en el tiempo. Por otro lado, la dispersión de los rodales está influida fundamentalmente por las prácticas agrícolas que se llevan a cabo en un campo determinado. De este modo, se pueden observar rodales en forma de franjas debido a los fallos en la aplicación de herbicidas, fallos de siembra, distribución de rizomas por las labores del cultivo, etc. La sucesión de cultivos dentro de la rotación supone igualmente un factor condicionante de la presencia de determinadas especies arvenses, ya que cada cultivo tiene unas necesidades, un ciclo biológico y una capacidad de competencia determinadas (Andujar, 2009).

En la tesis doctoral realizada por Andujar en 2009, sobre la distribución espacial de la especie *Sorghum halepense*, se observó una disminución en la presencia de éstas según se aumentaba la proximidad al borde de la parcela.

FIGURA 1

Reducción del daño que una densidad dada de malas hierbas produce en la cosecha (izda.) y cambios de la composición de la comunidad de malas hierbas desde indeseables hacia especies deseables (drcha.) (Mohler *et al.*, 2007).



Hortibot (Aarhus University, Dinamarca).

Así se obtenían los niveles de infestación más altos en los cuatro primeros metros de distancia al perímetro de la parcela, reduciéndose a medida que la distancia al borde aumentaba.

En dicha tesis se demostró que la mayoría de la superficie infestada (>7 plantas m⁻²), un 73%, correspondió a un reducido número de rodales (1% del total) de gran tamaño (>1.000 m²). Por el contrario, el mayor porcentaje de las observaciones fueron puntuales (61% del total) o formaban rodales de tamaño inferior a 50 m² (19% del total), aunque la superficie total ocupada por estos pequeños rodales no supuso más del 5% de la superficie ocupada por *S. halepense*. El resto de la superficie infectada, un 19%, correspondió a rodales de tamaño medio (entre 50 y 1.000 m²) (Andujar, 2009).

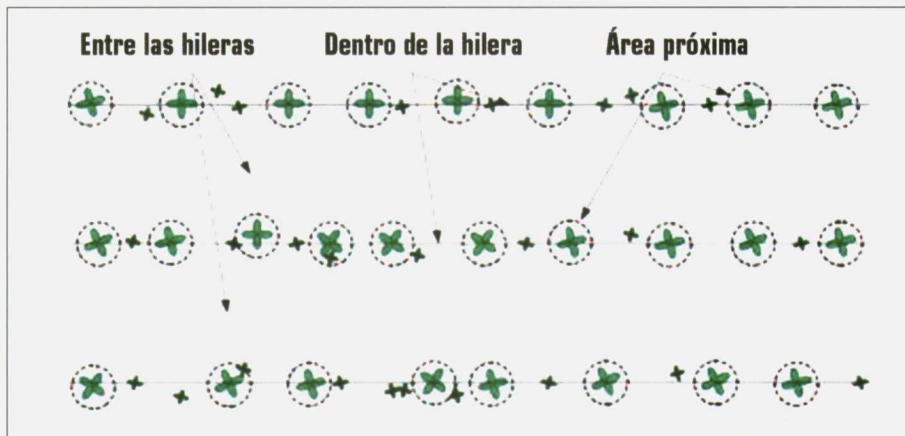
Con el fin de incrementar la eficacia de los diferentes métodos de escardado, parece recomendable dividir la superficie del campo en diversas zonas. Tres diferentes áreas se han identificado dentro de un campo de cultivo (figura 2), con sus diferentes técnicas de aplicación necesarias (Nørremark y Griepentrog, 2004a):

1. Área entre las hileras (*inter-row area*): zona fácil de controlar, debido al fácil acceso de las herramientas de cultivo entre las hileras. Por ello, la mayor parte de las investigaciones sobre el control mecánico de las malas hierbas se han centrado en la eliminación de las malas hierbas encontradas en esta área (Dedouis *et al.*, 2005).

2. Área entre las plantas dentro de la hilera (*intra-row area*): donde resulta más difícil elimi-

FIGURA 2

Blancos para el control de las malas hierbas: *inter-row*, *intra-row* y *close-to-crop* (Åstrand y Baerveldt, 2004).



nar la mala hierba, debido a su proximidad a la planta con el consiguiente riesgo de dañarla. En general, a menor resolución espacial respecto al blanco (cuanto más grande es la mínima zona de actuación) es necesaria una mayor distancia de operación a la planta, con el fin de reducir al mínimo el daño (Nørremark y Griepentrog, 2004a).

3. Área próxima y alrededor de la planta (*close-to-crop area*): en ella, las malas hierbas situadas cerca de la planta producen un impacto negativo en el cultivo, reduciendo su producción. Por lo tanto, el acercamiento a las malas hierbas en las proximidades del cultivo, incluso

bajo las hojas del mismo, es un requisito importante para los métodos de operación de escarda.

El control de algunas especies de mala hierba en el área próxima al cultivo, podría dar nuevas oportunidades para la ecología, estrategias de escardado y biodiversidad. Las estrategias altamente selectivas de control de las malas hierbas pueden ser dirigidas hacia los periodos clave de crecimiento y a las principales especies problemáticas, con la finalidad de minimizar el impacto de las malas hierbas en la producción y calidad del cultivo (Nørremark y Griepentrog, 2004b).



Tractor automático Hakotrac 3000 con sistemas RTK-GPS (escarda mecánica dentro de la hilera) (KVL Denmark).

Tecnologías disponibles

Los robots agrícolas incorporan tres elementos básicos (Slaughter *et al.*, 2007):

1) Un sistema de detección para medir características físicas y biológicas del sistema agrícola.

2) Un dispositivo con capacidad de toma de decisiones basadas en la información del sistema de percepción y que determine cómo debe ser manipulado el sistema agrícola.

3) Los actuadores encargados de manipular el sistema agrícola de forma adecuada, en este caso la aplicación variable de producto fitosanitario o de tratamiento térmico con el láser.

Los controles robóticos de malas hierbas son viables gracias a tecnologías disponibles como la visión artificial, los sistemas de posición global y las técnicas robotizadas de aplicación variable de insumos.

Diversas características visuales se han utilizado en la segregación de las especies botánicas, pudiéndose establecer tres categorías:

- Morfológicas biológicas: emplean el reconocimiento de la forma, que puede ser conducido a altos niveles de abstracción: geométrico, estructural y semántico.

- Espectrales, siendo utilizadas técnicas de reflexión de color o espectral para la identificación de especies botánicas.

- Textura visual computacional de imágenes en escala de grises o a color para identificar las especies (Slaughter *et al.*, 2007).

Por otra parte, en los sistemas robóticos, existen cuatro tipos de eliminación mecanizada de mala hierba que pueden ser empleados para el control selectivo dentro de la hilera: mecánico (cuchillas mecánicas y azada rotativa), químico (herbicidas), térmico (llama, agua caliente, vapor, congelación, luz UV y láser) y eléctrico (descarga eléctrica) (Slaughter *et al.*, 2007).

La aplicación variable de insumos en la producción agrícola, puede abordarse con dos enfoques diferentes: basado en mapas y basado en sensores, dentro de una técnica que se conoce como MSE o agricultura de precisión.

El método de mapas se caracteriza por el uso de representaciones espaciales relativas a la productividad del cultivo, de las propiedades del suelo, de las infestaciones de plagas y de las dosis para la aplicación variable (Morgan *et al.*, 2001). Mientras que el otro método MSE,

denominado basado en sensores, tiene la capacidad de variar los índices de aplicación de insumos en tiempo real sin la necesidad de recurrir de mapas previos. Por esta razón, el método basado en sensores emplea sistemas de detección para medir las características deseadas en tiempo real, información que ha de procesar y emplear *in situ* para controlar al aplicador de tasa variable de insumos. La **figura 3** muestra ambos sistemas.

Experimento

En este apartado se refiere la parte experimental del trabajo que se llevó a cabo en Dinamarca. El experimento se realizó en laboratorio, donde se empleó un láser de CO₂ para estudiar la respuesta de diferentes especies de mala hierba, dependiendo de la dosis/tiempo aplicados. Los resultados se han empleado como base para delinear la función dosis-respuesta, donde la respuesta se establece en términos de relación entre el peso fresco de la planta y la energía aplicada por el láser, con la intención de calcular la energía requerida por hectárea.



Fotografía de *Tripleurospermum inodorum*, *Papaver rhoeas* y *Veronica persica* diecisiete días después de ser tratadas con el láser de 12 W, 10,6 µm con un diámetro de ataque de 2,95 mm. De izquierda a derecha y de arriba a abajo, las cantidades de energía aplicadas por el láser fueron A (6 J), B (12 J), C (18 J), D (30 J) y E (36 J).

Como se ha indicado, los experimentos fueron realizados en la Universidad FLS (Faculty of Life Science) bajo condiciones controladas, para el que se emplearon macetas de crecimiento. En este estado se han evaluado dos diámetros de rayo y diferentes dosis de energía seleccionados variando el tiempo de exposición del láser. La eficacia biológica del sistema láser fue examinada en tres especies de mala hierba: *Tripleurospermum inodorum*, *Papaver rhoeas* y *Veronica persica*.

El equipo o materiales que se han empleado en este experimento son:

1. Láser de CO₂: modelo Lasy 12, con una potencia de 12 W y una longitud de onda de alrededor de 10,6 µm.
2. Generador de funciones y osciloscopio: con el propósito de generar un impulso, que provoque el encendido o apagado del láser a intervalos prefijados de tiempo, se ha empleado el siguiente dispositivo:
 - 434 Storage Osciloscopio Tektronik.
 - Generador de funciones: Thandar TG502 5MHz Sweep.
3. Cámara térmica: para predecir los mejores intervalos de tiempo o dosis aplicadas por el láser antes de comenzar el experimento principal. La cámara empleada es una Thermo Tracer NEC TH6100 con una versión de hardware 2.12 y un soporte de *software* de versión 1.34.
4. Diferentes especies de mala hierba. Las especies de malas hierbas seleccionadas en la etapa cotiledón son:
 - Manzanilla sin olor (*Tripleurospermum inodorum*).

MADRID AGRICOLA
GANADERIA
CULTIVOS
ENERGIA SOSTENIBLE
SECTOR FORESTAL

20 02 2011
24 02
PARIS
NORD VILLEPINTE
FRANCE

SIMA
SIMAGENA - SIMAVIP
MUNDIAL DE PROVEEDORES DE LA
AGRICULTURA Y GANADERIA

¡Nuestra Estrategia: acompañarle con eficacia!

VISITA ÚTIL

Descubrimiento del Palmarés de la Innovación

1 350 expositores de 38 países, 1 446 marcas

Encuentro de la genética de alto rendimiento

Bovino de leche y de carne/ SIMAGENA

Plataforma de energías sostenibles

Panorama de las perspectivas del sector agrícola

30 talleres, 15 conferencias y 4 visitas a explotaciones

VISITA PRÁCTICA EN UN CLIC

Imprima **gratuitamente** su pase con su nombre y lo **recibirá por mail**.

Prepare **una visita a su medida** gracias al plano interactivo.

Todo en www.simaonline.com o en www.planetagri.com

NUEVO

¡Gane tiempo el día de su visita!

Reserve también, con antelación, su almuerzo así como el SIMA'S BOOK, (el catálogo de expositores y todas las innovaciones presentadas).

Para eso, le esperamos en la sección SIMA de www.planet-agri.com, sitio web o en www.simaonline.com

PARIS, CAPITAL DE LA AGRICULTURA:

EN 2011, SIMA SE LLEVARÁ A CABO AL MISMO TIEMPO QUE LA FERIA INTERNACIONAL DE AGRICULTURA

Feria Internacional de Agricultura – 19 al 27 febrero de 2011 – Paris Porte de Versailles - Francia

Para más información y ayudarle a preparar su viaje:

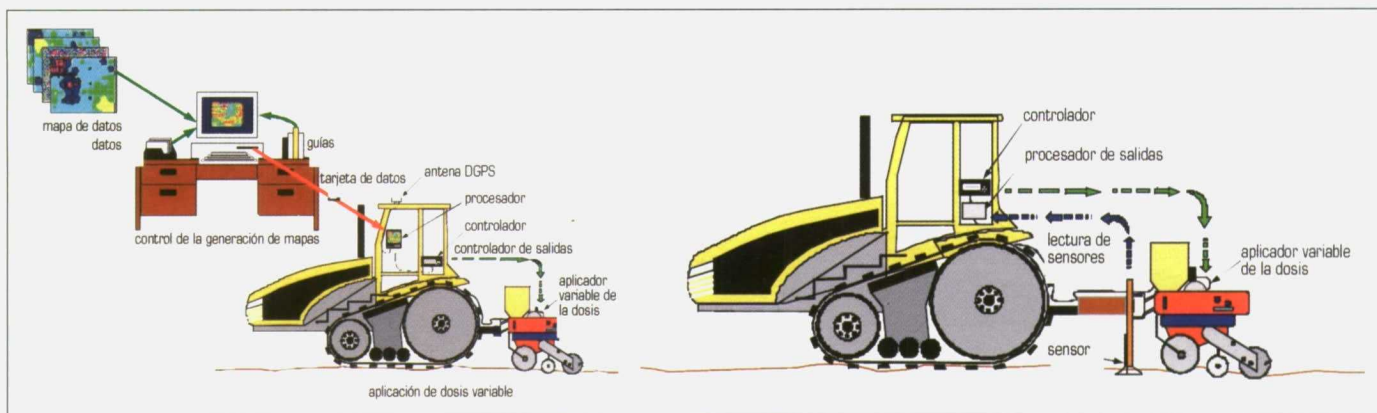


Promosalons España
914119580
promosalons@promosalons.es



FIGURA 3

Método de mapas y basado en sensores para la variación de los índices de aplicación de insumos al cultivo (Morgan *et al.*, 2001).



- Amapola (*Papaver rhoeas*).
- Verónica (*Veronica persica*).

5. Análisis de la varianza (Anova): es la herramienta utilizada principalmente a la hora de valorar los efectos de los tratamientos en el diseño experimental.

Una vez realizada la selección final de parámetros, los pasos seguidos han sido los mismos para todas las plantas, modificándose solo el diámetro del rayo o la distancia entre el láser y la planta, la especie de mala hierba y la frecuencia de la radiación, repitiéndose el tratamiento en tres veces (figura 4).

Diecisiete días después de ser realizado el tratamiento, siendo eliminadas cada dos días las plantas que emergieron con posterioridad, se procedió a la recogida de *Tripleurospermum inodorum*, *Papaver rhoeas* y *Veronica persica*,

con el propósito de comparar los pesos frescos obtenidos en las distintas especies por las distintas dosis.

De los datos recogidos se dedujo que el factor más significativo en el control de la biomasa de estas especies arvenses fue el nivel de energía ($F=15,3$), seguido de la especie ($F=12,0$), siendo el resto de los factores no significativos a un nivel del 5%.

La modelización de la respuesta de la especie al láser se llevó a cabo en la UPM (Universidad Politécnica de Madrid). Allí, a la vista de los resultados, se tomó la determinación de realizar un ajuste sigmoide, que es el más adecuado para la modulación de este tipo de respuestas, dado que es una función acotada entre dos valores: el valor inicial y final, aspecto indispensable en el comportamiento de las

plantas que puede oscilar entre no efecto y muerte o eliminación completa de la materia fresca. Para la realización del ajuste de los parámetros del modelo se emplearon diversas funciones programadas en Matlab 7.0.

De este ajuste se obtuvieron los valores objetivo que permitirían garantizar la eficacia del tratamiento (reducción de materia fresca a un 10% de la materia fresca original): 19,59 J/planta para la especie 1 (*Tripleurospermum inodorum*); 21,67 J/planta para la especie 2 (*Papaver rhoeas*); y fue posible extrapolar la energía necesaria para hacer eficaz el tratamiento en la especie 3 (*Veronica persica*) con una necesidad energética de 47,68 J/planta (figura 5). Nótese que el tratamiento no causa la muerte inmediata, sino que su efecto se difiere en el tiempo de manera que la planta arvense deja de competir con el cultivo.

Una vez calculada la energía necesaria para tratar una planta, es importante predecir la energía necesaria para tratar una hectárea de campo, para lo que serán utilizados los resultados obtenidos en el experimento. Con el fin de realizar esta predicción, algunas variables han de ser supuestas, como son: la densidad de las malas hierbas de acuerdo con las consideraciones iniciales (100 plantas/m²) y el área de las diferentes zonas de ataque (100, 80 y 20% del suelo). Este valor considerado de densidad de mala hierba es muy elevado, pero es factible en Dinamarca.

En este estudio se han considerado fundamentalmente dos estrategias: una escarda convencional, donde todas las malas hierbas son eliminadas; y una escarda selectiva, donde se tratan sólo las especies más dañinas. En los

CUADRO I.

ED₉₀ (densidad de energía para reducir la biomasa en un 90%, MJ/ha) con escarda selectiva dependiendo de la especie a eliminar y de la zona a tratar para la composición 1.

Especies a eliminar	Área entre plantas dentro de la hilera (20%) (MJ/ha)	Área entre hileras (80%) (MJ/ha)	Toda el área (100%) (MJ/ha)
Todas	6,36	25,42	31,78
<i>T. Inodorum</i>	0,78	3,14	3,92
<i>P. Rhoeas</i>	0,87	3,46	4,33
<i>V.persica</i>	1,91	7,62	9,53
Otras	2,8	11,2	14
Otras y <i>P. Rhoeas</i>	3,67	14,66	18,33
Otras y <i>T. Inodorum</i>	3,58	14,34	17,92
Otras y <i>V.persica</i>	4,71	18,82	23,53
<i>P. Rhoeas</i> y <i>T. Inodorum</i>	1,65	6,6	8,25
<i>P. Rhoeas</i> y <i>V. persica</i>	2,77	11,1	13,87
<i>T. Inodorum</i> y <i>V. persica</i>	2,69	10,76	13,45
<i>P. Rhoeas</i> , <i>T. Inodorum</i> y <i>V. persica</i>	3,56	14,23	17,79

dos tipos de escarda, se consideran distintas composiciones de malas hierbas con el fin de simular diferentes escenarios (cuadro I).

Los resultados muestran un gran potencial del láser, y más cuando éste se combina con una estrategia de escarda selectiva, obteniendo muy bajos valores de energía requerida por hectárea cuando se compara con la escarda convencional con láser. Usando una estrategia de escarda selectiva con un tratamiento láser térmico pueden alcanzarse ahorros energéticos de hasta el 80% (MJ/ha) comparado con una escarda convencional con láser térmico, lo que supone una gran reducción con respecto a la energía empleada.

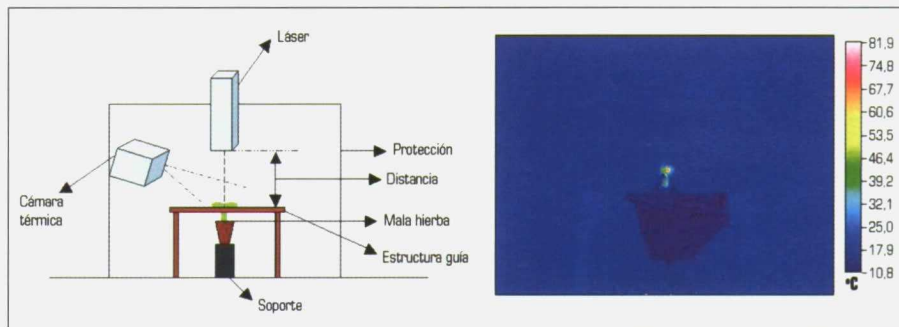
Conclusiones

La escarda selectiva es una nueva estrategia donde no todas las malas hierbas presentes en el campo son eliminadas, sino solo aquellas más perjudiciales. La escarda selectiva además tiene en cuenta las diferentes zonas de ataque (intra línea, inter línea y área próxima al cultivo), reduciendo así el área de trabajo.

Si combinamos esta nueva estrategia con el uso del láser de CO₂ para el control térmico de las malas hierbas, el resultado es un sistema muy prometedor. En este nuevo sistema, no sólo se reduce la polución, debido a la eliminación de herbicidas, sino que se promueve el aumento de la biodiversidad, evitando la eliminación indiscriminada de especies vegetales. Finalmente resulta del máximo interés la capacidad de reducción de la energía requerida para el trata-

FIGURA 4

Diagrama de la estructura usada (izda.) y fotografía térmica después de ser aplicados 0,2Hz de frecuencia de láser (drcha).



miento con el sistema propuesto, obteniéndose niveles muy bajos de energía para lograr un ED90 (energía requerida para reducir en 90% el peso fresco). Especialmente, cuando se aplica en la intra línea, que alcanzan reducciones de 1/70 de energía requerida para tratar una hectárea en relación con otros experimentos también de láser térmicos (Fernández, Heisel *et al.* y Mathiasen *et al.*).

Todas estas características (reducción de la polución, aumento de la biodiversidad y reducción de la energía requerida) hacen de la escarda selectiva con láser térmico una estrategia muy prometedora, que será evaluada en Dinamarca sobre sistemas robóticos en campo en un futuro cercano.

Este estudio es la base de una línea de investigación activa en la University of Life Sciences de Copenhague (Dinamarca), y de una intensa colaboración de dicha institución con la

Universidad Politécnica de Madrid (UPM), que en la actualidad participa en un proyecto europeo (RHEA) para la aplicación de sistemas robóticos en la agricultura. Dicho proyecto está siendo coordinado por el Instituto de Automática Industrial y en él participan catorce instituciones europeas. ●

Agradecimientos

Este artículo no habría visto la luz, de no ser por los consejos y apoyo de mucha gente que estuvo conmigo durante su elaboración. A todos ellos: ¡gracias!

Bibliografía

Existe una amplia bibliografía a disposición de nuestros lectores que pueden solicitar a través del e-mail: redaccion@eumedia.es

FIGURA 5

Representación de los modelos logísticos empleados para ajustar los datos experimentales, relacionando la biomasa (g/planta) con la energía aplicada por el láser (J/planta) en las tres especies utilizadas.

