

Control integrado de malas hierbas resistentes a herbicidas

Métodos aplicados en agricultura sostenible en España

Uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la agricultura del siglo XXI es la aparición de resistencias de malas hierbas a herbicidas, a los que originariamente fueron sensibles. Estas resistencias vienen impuestas por la aplicación continuada de herbicidas, que caracteriza a los modernos sistemas de producción agrícola.

Rafael De Prado y Rafael De Prado Jr.

Departamento de Química Agrícola y Edafología,
Universidad de Córdoba.

mente asociado a la introducción de pesticidas dentro de los sistemas agrícolas para el control de plagas, enfermedades y malas hierbas. La aparición de malas hierbas resistentes a herbicidas ha ocurrido relativamente tarde con respecto a otros pesticidas, y no tuvo lugar hasta finales de la década de los sesenta, con el primer caso descrito en poblaciones de *Senecio vulgaris* resistentes a las s-triazinas atrazina y simazina. Desde la identificación de este primer biotipo ha tenido lugar un fuerte incremento en el número de malas hierbas resistentes a diferentes herbicidas en distintas partes del mundo. La última revisión ha sido realizada por el Dr. Ian Heap (2003) y se puede encontrar en Internet (www.weedscience.com). En esta revisión se recogen 276 biotipos resistentes en el mundo, de ellos 29 han sido detectados en España (cuadro I).

El concepto de agricultura sostenible y producción integrada comprende una gama de estrategias dirigidas a resolver muchos de los problemas que afligen a la agricultura actual. Entre tales problemas se incluyen: la pérdida de productividad de los suelos por la erosión excesiva, asociada a pérdida de nutrientes; la contaminación de aguas superficiales y subterráneas por pesticidas, fertilizantes y sedimentos; la disminución de la biodiversidad; la falta de recursos no renovables y la baja renta agrícola motivada por la depresión de los precios y los altos costes de producción. El término "sostenible" implica una dimensión temporal y la capacidad de un sistema agrícola de permanecer y durar indefinidamente. La agricultura sostenible detiene el agotamiento y la destrucción de los recursos naturales y fomenta un aumento sostenido y ecológicamente viable de la producción agrícola (Jiménez-Díaz y Lamo de Espinosa, 1998).

En el pasado, el control de malas hierbas se ha caracterizado por el desarrollo de estrategias que buscaban conseguir metas económicas y sociales, sin unir estas estrategias a factores biológicos y sin investigar cómo interaccionan esos factores. Este tipo de prácticas ha derivado con el tiempo en una mayor contaminación de las aguas subterráneas, en un incremento de la mortalidad de organismos no relacionados con los procesos de infestación de malas hierbas, así como la aparición de biotipos resistentes a aquellos herbicidas a los que originariamente fueron sensibles. Sin lugar a dudas, la aparición de resistencia es considerada como uno de los mayores problemas de la agricultura del siglo XXI, desde un punto de vista científico, económico y agronómico (LeBaron y Gressel, 1982; Powles y Holtum, 1994; De Prado et al., 1997; Powles y Shaner, 2001; De Prado et al., 2001; Gressel, 2002).

El fenómeno de la "resistencia" ha estado inevitable-

CUADRO I. MALAS HIERBAS RESISTENTES A HERBICIDAS EN ESPAÑA

Especie	Localización/Año	Herbicida	Cultivo	Resistencia	Mecanismo
<i>A. theophrasti</i>	Sevilla:1997	Atrazina	Maíz	Simple	Detoxificación
<i>A. plantago-aqua.</i>	Badajoz: 2000	Bensulfuron	Arroz	Cruzada	Mutación
<i>A. myosuroides</i>	Lérida:1990	Clortoluron	Trigo	Cruzada	Detoxificación
<i>A. albus</i>	Córdoba:1987	Simazina	Olivar	Cruzada	Mutación
<i>A. blitoides</i>	Córdoba:1986	Simazina	Olivar	Cruzada	Mutación
<i>A. cruentus</i>	Zaragoza: 1989	Atrazina	Maíz	Cruzada	Mutación
<i>A. hybridus</i>	Córdoba:1985	Atrazina	Maíz	Cruzada	Mutación
<i>A. retroflexus</i>	Zaragoza:1986	Atrazina	Maíz	Cruzada	Mutación
<i>A. squamatus</i>	Sevilla:2000	Imazapir	Borde carretera	Cruzada	Mutación
<i>A. fatua</i>	Lérida:2000	Imazametabenz: diclof.	Trigo	Múltiple	??
<i>A. ludoviciana</i>	Lérida:2000	Imazametabenz: diclof.	Trigo	Múltiple	??
<i>B. tectorum</i>	Córdoba:1985	Clortoluron : simazina	Trigo - Olivar	Cruzada	Detoxificación
<i>C. album</i>	Córdoba:1987	Atrazina	Maíz	Cruzada	Mutación
<i>C. albidus</i>	Sevilla: 2000	Imazapir	Borde carretera	Cruzada	Mutación
<i>C. bonariensis</i>	Jaén:1987	Simazina	Olivar	Cruzada	Cruzada
<i>C. canadensis</i>	Jaén:1987	Simazina : atrazina	Olivar - Maíz	Cruzada	Simple
<i>C. difformis</i>	Badajoz: 2002	Bensulfuron	Arroz	Cruzada	Cruzada
<i>E. crus galli</i>	Sevilla: 1992	Quinclorac	Arroz	Simple	Detoxificación
<i>E. crus galli</i>	Huesca:2002	Propanil	Arroz	Simple	Detoxificación
<i>E. crus galli</i>	Sevilla:1992	Atrazina	Maíz	Cruzada	Mutación
<i>E. oryzicola</i>	Badajoz:2001	Fenoxaprop	Arroz	Cruzada	Detoxificación
<i>L. multiflorum</i>	Lérida: 1999	Diclofop	Trigo	Cruzada	Mutación
<i>L. multiflorum</i>	Jaén: 2002	Glifosato: diclofop	Olivar	Múltiple	No translocación
<i>L. rigidum</i>	Jaén: 1995	Simazina	Olivar	Cruzada	Mutación
<i>L. rigidum</i>	Córdoba: 1998	Clortoluron : diclofop	Trigo - cebada	Cruzada	Detoxificación
<i>L. rigidum</i>	Lérida: 1998	Clorsulfuron	Trigo	Cruzada	Detoxificación
<i>P. rhoeas</i>	Lérida: 1993	2,4-D: triasulfuron	Trigo	Múltiple	??: Mutación
<i>P. lapathifolium</i>	Sevilla: 1991	Atrazina	Maíz	Cruzada	Mutación
<i>S. adherens</i>	Córdoba: 1996	Atrazina	Maíz	Simple	Detoxificación
<i>S. faberi</i>	Sevilla: 1994	Atrazina	Maíz	Cruzada	Mutación
<i>S. glauca</i>	Córdoba:1987	Atrazina	Maíz	Cruzada	Mutación
<i>S. verticillata</i>	Córdoba:1996	Atrazina	Maíz	Simple	Detoxificación
<i>S. viridis</i>	Málaga: 1992	Atrazina	Maíz	Cruzada	Mutación
<i>S. viridis</i>	Málaga: 2000	Haloxifop	Cebolla	Cruzada	Mutación
<i>S. nigrum</i>	Córdoba:1985	Atrazina	Maíz	Cruzada	Mutación

Como consecuencia de la presión selectiva, impuesta por la aplicación continuada de herbicidas que caracteriza a los modernos sistemas de producción agrícola, es posible el desarrollo de biotipos de malas hierbas que dejan de ser controlados por un determinado producto al que precedentemente eran susceptibles. Tal respuesta se conoce generalmente como "resistencia", siendo una característica adquirida por una población (biotipo) de una especie que carecía de ella y ha

sido definida por la HRAC (Herbicide Resistance Action Committee), como «la habilidad/aptitud heredable de una especie vegetal a sobrevivir y reproducirse después del tratamiento de un herbicida a dosis normalmente letales para la misma especie susceptible. En una planta, la resistencia puede ocurrir de una forma natural o puede ser inducida por técnicas como la ingeniería genética o selección de variantes resistentes obtenidas por cultivos de tejidos o mutagénesis». El término de "resistencia" suele ir adjetivado con diversos modificadores que hacen alusión a la posible pluralidad existente tanto en los mecanismos de resistencia que posee un individuo como en los herbicidas a los que éste es resistente. Surgen así los conceptos de resistencia cruzada y múltiple. Dependiendo de los autores consultados, estas definiciones se asociarán a mecanismos de resistencia:

Resistencia cruzada: aquella por la que una población es resistente a dos o más herbicidas que actúan en el mismo sitio primario de acción.

Resistencia múltiple: aquella por la que una población es resistente a dos o más herbicidas que actúan en distinto sitio primario de acción.

Mecanismos de resistencia en plantas

Se han descrito al menos cuatro diferentes mecanismos que explican la resistencia de una planta a los herbicidas (De Prado et al., 1997). Los dos cuantitativamente más importantes son los que implican reacciones metabólicas y cambios en la secuencia de ADN (mutaciones) que alteran la estructura de las proteínas diarias (Gressel, 2002). Las reacciones metabólicas de una planta terminan por modificar la naturaleza química y las propiedades de un herbicida, y predominan cuando se observa tolerancia o resistencia natural. Permite a las plantas detoxificar al herbicida a una velocidad que impide que llegue a acumularse a niveles tóxicos. Las mutaciones no alteran la naturaleza química de los herbicidas, sino las interacciones de éstos con las proteínas diarias y son predominantes cuando un individuo adquiere resistencia a un herbicida, soliendo corresponder a tratos de carácter dominante. Los otros dos mecanismos de resistencia implican, o bien una alteración en la penetración o translocación del herbicida hacia el interior de la célula de las plantas, o bien la sobreexpresión de la proteína diaria como consecuencia de una duplicación génica o mutaciones en el promotor. Estos dos procesos afectan principalmente el número de moléculas diarias que permanecen libres de herbicidas y han sido escasamente encontrados y docu-



Foto 1. *Cyperus difformis* resistente a bensulfuron detectado en arroz.

mentados (Gressel, 2002). Es esencial conocer la bioquímica, la genética y los cambios moleculares que subyacen en los mecanismos de resistencia para poder diseñar y ejercer una correcta y efectiva gestión en el uso de los herbicidas. Existen herbicidas que actúan de forma sinérgica y otros, de forma antagónica. Es necesario determinar qué herbicidas deberían usarse en combinaciones o en rotaciones para optimizar los resultados previniendo al mismo tiempo

la aparición de nuevos casos de resistencia. Conforme se descubren nuevos herbicidas, es posible usar los resultados obtenidos en el laboratorio para predecir los mecanismos y la genética de la resistencia antes de que ésta aparezca en el campo de forma natural. Toda esta información permitiría optimizar el uso de los herbicidas minimizando los problemas que su uso hasta ahora está ocasionando.

Malas hierbas resistentes en España

Hasta el día de hoy, v29 biotipos de malas hierbas han sido detectados en España como resistentes a herbicidas. Aunque al principio el número de dicotiledóneas era muy superior al de monocotiledóneas, hoy día el número se ha equilibrado debido a la rápida aparición de gramíneas resistentes a los herbicidas anti-gramíneas en trigo y arroz, principalmente (**cuadro I**).

Arroz

España es junto con Italia uno de los países más importantes de Europa como productores de este cultivo y uno de los primeros en el mundo en la obtención de rendimiento por hectárea. La aparición de biotipos resistentes ha sido lenta debido principalmente a la rotación de herbicidas realizada por el agricultor en el control de las malas hierbas. Sin embargo, durante la década de los noventa aparecen herbicidas muy eficaces en el control y con una alta presión de selección sobre malas hierbas, tales como *Echinochloa* spp, *Alisma* spp, *Cyperus* spp, etc. (**foto 1**).

De todas ellas la más peligrosa es el género *Echinochloa* por la gran capacidad natural de metabolización que tiene de herbicidas tales como quinclorac, cihalofop y propanil. La alta habilidad que tiene este género para cruzarse entre las diferentes especies hace aún más difícil su control químico. La mezcla de herbicidas con diferente modo de acción y el uso de nuevos herbicidas que actúen en diferentes dianas moleculares habría que tenerlos en cuenta. *Alisma plantago aquatica* y *Cyperus difformis* han aparecido últimamente en campos de Badajoz y de Huesca resistentes a bensulfuron; ensayos realizados en nuestro laboratorio muestran que un buen control puede ser obtenido con bentazona a dosis agrícolas. Los mecanismos subyacentes de estas especies a los herbicidas inhibidores de la enzima Aceto lactato sintasa (ALS) es la pérdida de afinidad entre la proteína y el herbicida. En la mayoría de estos casos no deberían aplicarse herbicidas de este grupo.

Maíz

El cultivo del maíz de regadío representa en el mundo desarrollado uno de los productos más rentables para el agricultor por su fácil mecanización y por la gran gama de variedades de maíz existente que hace que pueda ser cultivado en todo el mundo. La gran tolerancia que tiene el maíz a las s-triazinas (inhibidores del transporte electrónico) hace que el agricultor lo haya utilizado desde la década de los setenta sin rotación y de forma masiva. La alta presión de selección de estos herbicidas residuales unida a la alta frecuencia de resistencia de ciertas malas hierbas dicotiledóneas del género *Amaranthus*, *Chenopodium*, *Solanum* es resultado de la aparición de biotipos resistentes en Norteamérica en los años setenta y en España alrededor de 1985 (**cuadro 1** y **foto 2**). De los catorce biotipos resistentes a atrazina detectados y caracterizados por nuestro grupo de investigación, ocho son dicotiledóneas y seis monocotiledóneas. Todos los biotipos de hoja ancha (excepto *Abutilon theophrasti*) presentan resistencia cruzada a todas las s-triazinas y as-triazinas y por ello su uso alternativo es completamente desaconsejado; el mecanismo de resistencia en estos casos ha sido una pérdida de afinidad del herbicida a la proteína de enlace D1. Las monocotiledóneas *Echinochloa cruz-galli*, *Setaria faberi*, *S. glauca* y *S. viridis* son casos de resistencia a triazinas en maíz idénticos a los expuestos anteriormente. Las especies de *S. adherens* y *S. verticillata* presentan ambas una alta tolerancia natural a las dosis agronómicas de atrazina en maíz (1,5 Kg/ha de materia activa) por metabolización a formas no tóxicas del herbicida, mientras que el biotipo de *A. theophrasti* presenta tolerancia por la presión de selección ejercida por el uso continuado de atrazina. Aunque un número pequeño de poblaciones resistentes han sido detectadas en Sevilla y caracterizado su nivel de resistencia en nuestro laboratorio, no estamos seguros de si la resistencia proviene de importaciones de maíz americano o la resistencia ha sido seleccionada en nuestros propios maizales. Excepto este último, el control químico de biotipos resistentes a triazinas no ha sido un grave problema al haber en el mercado un gran número de herbicidas alternativos, como pueden ser los ejemplos de piridato, bentazona, la mayoría de los inhibidores de la Aceto lactato sintasa (sulfonilureas e imidazolinonas) y por supuesto el caso del uso de maíz resistente a glifosato y/o glufosinato. En caso de campos infestados de *A. theophrasti* resistentes y sensibles a triazinas es necesario realizar las aplicaciones tempranas (dos a cuatro hojas verdaderas), debido al desarrollo de esta especie de una alta tolerancia por falta



Foto 2. *Chenopodium album* resistente a atrazina detectado en maíz.

de penetración o metabolismo de los herbicidas en mayores estados vegetativos.

Olivar y otros cultivos leñosos

Los cultivos leñosos ocupan una superficie total de 4,8 millones de ha, de las cuales 2,3 millones pertenecen al cultivo del olivar como cultivo principal seguido del cultivo de cítricos. En ambos casos el uso de herbicidas es una de las técnicas de control más antiguas al permitir luchar contra la erosión y mantener el suelo limpio durante el ciclo productivo del cultivo. Sin embargo, el uso de una misma molécula en pre o postemergencia sin rotación y/o mezcla de herbicidas ha ejercido una fuerte selección sobre las poblaciones de malas hierbas. Simazina es una cloro s-triazina que ha tenido un gran impacto agrícola sobre el olivar. Su uso data de finales de la década de los sesenta y fue aplicada de forma continuada a altas dosis (en casos especiales a 5 kg/ha de materia activa) en preemergencia otoñal de las malas hierbas. Hoy día esta molécula ha perdido mucha eficacia, debido a la aparición de biotipos resistentes y a la selección de poblaciones de microorganismos que degradan la simazina. La aparición de residuos de simazina por erosión de partículas de suelo en aguas almacenadas para uso humano o de aprovechamiento agrícola ha desembocado en su prohibición en el olivar. Los primeros biotipos resistentes a simazina aparecen a mediados de 1985 y pertenecen al género *Amaranthus* (*A. albus* y *A. blitoides*), presentando una pérdida de afinidad entre la proteína de enlace y el herbicida; ambos biotipos muestran resistencia cruzada a todas las triazinas y sólo la mezcla con otros herbicidas de diferente modo de acción desarrollará un buen control. El género Coniza está mostrando una gran dificultad en su control no sólo a simazina, a la que ha desarrollado resistencia, si no también a otra serie de herbicidas de contacto y de alta eficacia como glifosato. Esta tolerancia que se ve incrementada con la edad de la planta podría ser debida a barreras fisiológicas (falta de penetración y/o translocación) más que a fenómenos bioquímicos de metabolización o de pérdida de afinidad. Una de las técnicas más interesantes en olivar y en cultivos leñosos en general es el uso de cubiertas vegetales (gramíneas principalmente) como medio de lucha para el control de malas hierbas y de la erosión en superficies de alta pendiente. Estas franjas vegetales hay que segarlas química o mecánicamente en marzo antes de que compitan por agua y nutrientes con el propio cultivo, el medio más usual ha sido la aplicación de herbicidas de contacto como es el glifosato. En 2002 ha sido detectado por nuestro grupo el primer biotipo de *Lolium* spp resistente a este herbicida en España y en Europa. Tres poblaciones resistentes están siendo estudiadas en nuestro laboratorio, teniendo una de ellas resistencia múltiple a diclofop-metil y clorsulfuron (**cuadro 1**). Prospecciones que estamos desarrollando en nuevas áreas muestran la posible selección de *Lolium multiflorum* en frutales de pepita (**foto 3**).

Cereales de invierno

Los cereales de invierno ocupan 6,2 millones de hectáreas de los suelos cultivables en España; de éstos, 2,5 millones de hectáreas corresponden a trigo de invierno. Los primeros herbicidas utilizados en trigo fueron los herbicidas auxínicos (2,4-D, MCPA, etc.) para el control de malas hierbas de hoja ancha, siendo posteriormente aplicados los inhibidores del transporte electrónico como herbicidas antigramíneos con buen resultado. Sin embargo, su media a baja selectividad en trigo y la aparición de nuevas familias de herbicidas con nuevos modos de acción en los prime-

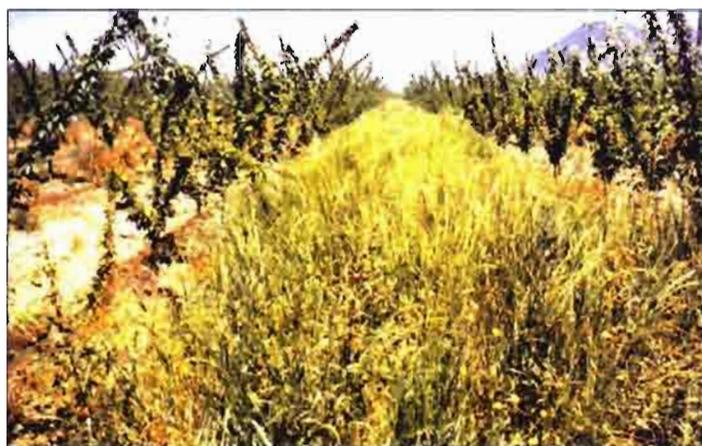


Foto 3. *Lolium* spp resistente a glifosato detectado en frutales de pepita.



Foto 4. *Lolium rigidum* resistente a diclofop-metil en trigo.

ros años de 1980 han dado paso al uso intensivo de herbicidas inhibidores de la Acetil CoA carboxilasa (ariloxifenoxipropanoatos y ciclohexanodionas) y los herbicidas inhibidores de la Aceto lactato sintasa (sulfonilureas e imidazolinonas, principalmente). El uso de esta gran gama de herbicidas sin rotación ha sido el desencadenante de la selección de resistencia muy rápida a partir de 1990. Aunque el primer caso data de 1985, donde un biotipo de *Bromus tectorum* presentó una alta tolerancia a clortoluron, fueron los casos de *Lolium* spp los más importantes desde un punto de vista científico y agronómico al presentar múltiple resistencia debido a mecanismos similares a los que presenta el trigo. Ciertas poblaciones detectadas por nosotros han mostrado resistencia a diclofop-metil, clortoluron, pendimetalina, clorsulfuron, imazametabenz y simazina (foto 4).

Control integrado de malas hierbas resistentes

Las prácticas de prevención y estrategias de control de biotipos resistentes deben ser necesariamente aplicadas antes del conocimiento completo de los mecanismos bioquímicos y del conocimiento de las bases genéticas de la resistencia (Powles y Shaner, 2001). Por ello es esencial el uso temprano de un control integrado de malas hierbas (IWM) en el cual la aplicación de un gran número de diferentes técnicas de control son posibles (de Prado et al., 1997; Radosevich et al., 1997). La consecución de este control se lleva a cabo mediante el uso de medidas culturales, así como con herbicidas.

Métodos de control cultural: labores; rotación de cultivos; quema de rastrojos; manejo de residuos; retraso de siembra; recolección de semillas de malas hierbas; limpieza de maquinaria; y control biológico y alelopático.

Métodos de control químico: herbicidas alternativos; mezcla y secuencia de herbicidas; rotación de herbicidas; manejo integral de herbicidas; siega química; y cultivos resistentes a herbicidas (OMG). ■

Agradecimientos: Los autores agradecen la ayuda financiera del MCYT (proyecto AGL-2000-1713) para la realización de esta revisión.

Bibliografía

De Prado, R. Jorrin, J. y García-Torres, L. 1997. Weed and Crop Resistance to Herbicides. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. The Netherlands.

De Prado, R. y Jorrin, J. 2001. Uso de Herbicidas en la Agricultura del Siglo XXI. Universidad de Córdoba. Córdoba. España.

Gressel, J. 2002. Molecular Biology of Weed Control. Taylor & Francis. New York. USA.

Jiménez-Díaz, R y Lamo de Espinosa, J. 1998. Agricultura Sostenible. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. España.

LeBaron, H. M. y Gressel, J. 1982. Herbicide Resistance in Plants. John Wiley & Sons. New York. USA.

Powles, S.B. y Holtum, J.A.M. 1994. Herbicide Resistance in Plants: Biology and Biochemistry. Lewis Publishers. Boca Raton. USA.

Powles, S. B. y Shaner, D. L. 2001. Herbicide Resistance and World Grains. CRC Press. Boca Raton. USA.

Radosevich, S. Holt, J. y Ghersa, C. 1997. Weed Ecology. Implications for Management. John Wiley & Sons. New York. USA.

Horticur

Bioactivador Completo y Equilibrado

ESPECIAL
HORTALIZAS

Estimula el desarrollo
de las brotaciones

Activa el cuajado

Mejora el engorde y
la calidad del fruto

Aumenta la resistencia
a las enfermedades



LA SEGURIDAD DE APLICAR UN BUEN PRODUCTO



XEM ABONOS

XEM ABONOS, S.L.
C/ Ibiza, 10

Tel.: 96 289 21 27 - Fax.: 96 289 06 62
46730 GRAO DE GANDIA (Valencia) ESPAÑA

Nutritivo - Energético y Revitalizante