LA RESISTENCIA A HERBICIDAS ES UNA COMPLEJIDAD QUE PUEDE MANEJARSE

Fischer, Alberto J.[1]

RESUMEN

La presión de selección a favor de biotipos resistentes se reduce a través de una acción integrada incorporando diversas medidas de control que reduzcan los niveles de infestación. El empleo de semilla certificada de cultivo libre de malezas, las inspecciones de campo y las pruebas de detección son fundamentales para la prevención y mitigación precoz de la resistencia. Las secuencias o mezclas de herbicidas con diferentes mecanismos de acción y rutas de inactivación en la planta son útiles para retrasar la evolución de resistencia. Pero el uso racional de herbicidas debe complementarse con técnicas agronómicas. Los mecanismos de resistencia ajenos al sitio activo y la evolución de resistencia cruzada y múltiple representan ciertamente un desafío que requiere estrategias creativas y enfatiza la necesidad de practicar un control integrado de malezas. El manejo de la resistencia es una tarea a largo plazo que implica mantener un registro de las técnicas de control que se han empleado como base para la acción futura. Los modelos de predicción son un apoyo para la investigación y para el diseño y selección de programas de manejo integrado de malezas rentables, permitiendo conservar a los herbicidas como herramientas útiles y preservar la sustentabilidad del manejo de malezas. La experiencia demuestra que la adopción de medidas de prevención y manejo de resistencia por parte del productor es un proceso difícil. Mucho esfuerzo debe volcarse en la implementación de programas educativos.

Palabras clave: combinaciones de herbicidas, manejo integrado de malezas, mecanismo ajeno al sitio de acción, prácticas agronómicas, resistencia a herbicidas, sitio de acción.

ABSTRACT

Herbicide Resistance: a Complexicity that Can be Managed

The selection pressure in favor of herbicide-resistant weed biotypes can be reduced by integrating diverse weed control measures to reduce the levels of weed infestation. The use of certified weed-free crop seed, field scouting, and resistance detection tests are useful for the early mitigation of resistance. The use of sequences and mixtures of herbicides with different mechanisms of action or inactivation pathways within plants can help delay resistance evolution. But the rational use of herbicides must be complemented by agronomic practices. Non-target-site resistance mechanisms and the evolution of cross- and multiple resistance are certainly a challenge that demands creative strategies and emphasizes the need for implementing an integrated weed management approach. Managing herbicide resistance is a long-term proposition that requires record-keeping of weed control practices as the basis for future actions. Prediction modeling is an aide for weed research that helps design economic integrated weed control programs to preserve herbicides as useful weed control tools and to enhance the sustainability of weed control. Experience shows that adoption of herbicide-resistance prevention and management strategies is a difficult proposition for growers. Much effort needs to be devoted to the implementation of education programs for pro-active grower decision making.

Key words: agronomic practices, herbicide combinations, herbicide-resistance, integrated weed management, non-target site mechanism, target-site.

[1]Profesor, Department of Plant Sciences, University of California-Davis, Davis, California 95616, USA.

INTRODUCCIÓN

Considerando que la evolución de la resistencia resulta del uso repetido de herbicidas que comparten el mismo mecanismo de acción y que además pueden tener en común un mismo proceso de inactivación dentro de la planta. Se ejerce así un proceso de selección que elimina los individuos susceptibles al herbicida en una población de cierta maleza, permitiendo así que aquellos portadores de genes de resistencia sobrevivan y se reproduzcan. De esta forma, los genotipos resistentes de esa especie de maleza gradualmente incrementan su proporción dentro de la población y terminan por ser el tipo dominante. El principio fundamental en el manejo de la resistencia es evitar la evolución de plantas con la capacidad genética para sobrevivir a un tratamiento de control, como puede ser un herbicida. Esto se logra mediante la diversificación de las medidas de control de malezas, empleando técnicas diferentes a fin de evitar que plantas que escapen a un herbicida y sean portadoras de genes de resistencia consigan producir semilla e incorporarla al suelo o dispersarla hacia otros ambientes. Para esto, es importante inspeccionar periódicamente los predios para detectar la presencia de tales sobrevivientes («escapes»). Los genotipos resistentes inicialmente suelen estar presentes en baja frecuencia en las poblaciones de malezas; de allí la importancia de mantener bajos niveles de infestación en los predios y de agotar el reservorio de semillas en el suelo. Asimismo, debe controlarse la dispersión de semillas o propágulos entre predios. Conocer la eco-fisiología de la especie de la maleza en cuestión permite identificar oportunidades de manejo y control en su estado más vulnerable. El conocimiento de los factores genéticos, biológicos y ecológicos que afectan la evolución de resistencia (por una revisión de éstos consultar Jasieniuk *et al.,* 1996) permitirá el uso de modelos de simulación que permiten evaluar estrategias de manejo para mitigar la evolución de resistencia (Neve *et al.,* 2003; Jones y Medd, 2005; Neve *et al.,* 2009).

En este trabajo se analizan los criterios generales sobre los que están basadas las prácticas y recomendaciones para situaciones específicas.

MANEJO PREVENTIVO

Es necesario evitar que el agricultor introduzca genotipos de resistencia en sus predios plantando semilla de cultivos del año anterior o empleando equipos agrícolas contaminados con semilla de malezas resistentes. Por lo tanto, la principal tarea de prevención es el uso de semilla certificada libre de malezas. Lamentablemente, en muchos casos se permite la presencia de un cierto número de malezas y nadie garantiza que esa semilla no haya sido cosechada en un predio con resistencia. La limpieza de los equipos de cosecha es, sin duda, un proceso laborioso y que nunca consigue eliminar todas las semillas contaminantes, no obstante su práctica es muy aconsejable en el esfuerzo global de evitar la dispersión de resistencia (Vencill *et al.,* 2012). Se aconseja cosechar por último aquellos sectores o lotes con resistencia antes de pasar a lotes sin resistencia. Biotipos de *Echinochloa phyllopogon* (Stapf) Koss. con resistencia a múltiples herbicidas que están ampliamente dispersos por los arrozales de California son probablemente descendientes de un mismo genotipo que se ha dispersado a partir de una fuente original (Tsuji *et al.,* 2003); el control de la dispersión de semilla resistente es así un objetivo prioritario en el manejo de este problema.

PRÁCTICAS AGRONÓMICAS QUE RETRASAN LA EVOLUCIÓN Y DISPERSIÓN DE LA RESISTENCIA

El objetivo es reducir la presión de selección ejercida con cierto herbicida integrando su uso con diferentes opciones no químicas de control. Estas técnicas deberán ser capaces de complementar el control con herbicidas y suprimir aquellos genotipos que escapen a su acción.

LA ROTACIÓN DE CULTIVOS

El empleo repetido de un mismo cultivo, o cultivos similares, en un predio da continuidad a las condiciones particulares de un cierto agro-ecosistema al cual ciertas especies maleza se han adaptado. La rotación con otro cultivo, empleando sistemas de implantación y manejo diferentes, permite interrumpir el ciclo biológico de muchas malezas con adaptaciones específicas, lo cual es útil para eliminar biotipos que hubieran evolucionado resistencia en el sistema anterior (Pittelkow *et al.,* 2012). Por alterar la composición florística de malezas e involucrar cultivos con tolerancias diferentes hacia los herbicidas, la rotación permite el empleo de técnicas culturales y herbicidas diferentes (Tuesca y Nisensohn, 2001). La agricultura con labranza reducida suele basar el control de malezas en el uso de un único herbicida sobre grandes extensiones, el cual a menudo se aplica de forma repetida. Con esto se ejerce una considerable presión de selección sobre las malezas (Vencill *et al.,* 2012). La rotación y la combinación de períodos con barbecho químico y con laboreo permiten retrasar considerablemente la evolución de resistencia (Hanson *et al.,* 2002). En la alternancia con pasturas perennes o cultivos de cobertura a menudo no se emplean herbicidas y se reduce la incorporación al suelo de semillas de malezas resistentes (Goddard *et al.,* 1996; Vencill *et al.,* 2012).

CONTROL PREVIO A LA SIEMBRA

Mediante un control inmediatamente previo a la siembra, técnica ésta que se conoce como «falsa siembra» o de «siembra retrasada», se espera que una lluvia o riego auxiliar promueva la emergencia de una amplia gama de malezas poco antes de sembrar el cultivo, incluyendo biotipos resistentes (individuos portadores de genes de resistencia dentro de la población de una especie maleza). Éstos pueden así eliminarse antes de la siembra con técnicas que no podrían usarse de forma selectiva en un cultivo, tales como laboreo o aplicación de un herbicida total para el cual no existe allí resistencia (Walsh y Powles, 2007). El caso ideal es cuando la siembra se hace con labranza cero sin remover el suelo, ya que no se promueve la emergencia de nuevas malezas (Linquist *et al.,* 2008).

LIMITAR LA PRODUCCIÓN DE SEMILLA

El objetivo de un control sustentable de malezas es buscar que el reservorio de semillas del suelo decline al menos no se incremente (Norsworthy *et al.,* 2012). Por lo que el concepto de umbrales de infestación, que permiten la supervivencia y semillazón de malezas cuya densidad está por debajo de un umbral económico de daño (Bosniæ y Swanton, 1997) es inadecuado para mitigar la evolución de resistencia. El uso de aplicaciones tardías con herbicidas, cultivares competitivos, elevadas densidades de siembra, y cuando sea posible, la eliminación no selectiva de manchones de infestación resultan prácticas útiles (Walsh y Powles, 2007; Beckie, 2011).Aunque muchas especies de maleza suelen desgranar antes de la cosecha, la destrucción de rastrojos puede ser útil para retardar la evolución de resistencia. Existen equipos que trituran y destruyen semillas de malezas que de otra forma caerían al suelo con los residuos de cosecha (Walsh *et al.,* 2012).

CULTIVOS COMPETITIVOS

La utilidad de cultivares de cereales altamente productivos y con elevada capacidad para suprimir el crecimiento y la fecundidad de malezas por competencia y/o alelopatía ya ha sido debidamente demostrada (Fischer *et al.* 2001, Gibson y Fischer 2004; Lemerle *et al.* 2000; Olofsdotter y Andersen 2004; Pérez de Vida *et al.* 2006). Este concepto no representa un costo adicional y permite reducir el uso de herbicidas y la selección por resistencia. Interacciones de competencia entre cultivo-maleza han mostrado magnificar costos en la aptitud ecológica asociados a la resistencia ajena al sitio de acción

(metabolismo P450) (Vila-Aiub *et al.,* 2009); es así como la competencia de trigo sobre biotipos de *Raphanus raphanistrum* resistentes a 2,4-D en Australia permitió suprimir la incidencia de esta maleza y facilitar su control (Walsh *et al.,* 2009). Prácticas culturales como fecha de siembra, fertilización y riego que den una ventaja de crecimiento inicial al cultivo sobre la maleza, o el empleo de espaciamientos angostos entre hileras y densidades de siembra elevadas, son otras formas de incrementar el control de malezas resistentes por interferencia del cultivo. A partir de cierto período crítico (Hall *et al.,* 1992; Knezevic *et al.,* 2002), muchos cultivos son capaces de suprimir el establecimiento de nuevas cohortes de malezas (Fischer *et al.,* 1993; Gibson *et al.,* 2002). Conocer la duración de ese período crítico y proporcionar las condiciones de crecimiento que lo expresen permite evitar la producción tardía de semillas de malezas y reducir el número de aplicaciones de herbicidas. El desarrollo de cultivares alelopáticos contra malezas (Gealy *et al.* 2005) representa, sin duda otra herramienta útil dentro de este concepto.

CONTROL NO QUÍMICO DE MALEZAS

Existe una amplia gama de prácticas no químicas de control de malezas que son de utilidad en el manejo de resistencia y de las cuales una reciente revisión acaba de ser publicada (Norsworthy *et al.,* 2012). Son técnicas para la diversificación del control de malezas que buscan retardar la resistencia a herbicidas y no permitir el enriquecimiento del reservorio de semillas del suelo con biotipos resistentes. El laboreo y las escardas mecánicas son útiles para eliminar plántulas de biotipos resistentes a herbicidas y estimular su germinación para el agotamiento del reservorio de semillas en el suelo. Pero su uso también puede implicar riesgos de erosión y contaminación atmosférica.

FORMA DE EMPLEAR LOS HERBICIDAS

Como se mencionó anteriormente, lo crítico es evitar el uso repetido de herbicidas que comparten el mismo mecanismo de acción o/y una misma ruta de inactivación dentro de la planta a fin de reducir la presión de selección que alimenta la evolución de resistencia en las poblaciones de malezas. Se deberá planear cuidadosamente el programa de uso de herbicidas para años futuros en función de lo que se hizo en el pasado, de los resultados de las inspecciones y de lo que informan las pruebas de detección (Valverde *et al.,* 2001). La reducción de la presión de selección no significa, necesariamente, una reducción de la cantidad de herbicida total usada, sino evitar el uso continuo de ingredientes con similar modo de acción (por ejemplo, inhibidores de la enzima *ACCasa, ALS, EPSPS*, y otros).

Se debe alternar y/o mezclar herbicidas con diferente mecanismo de acción:

- Cuando la resistencia está conferida por alteraciones en el sitio de acción del herbicida. La resistencia de sitio de acción es conferida por una alteración que causa la pérdida de susceptibilidad de una maleza a herbicidas con un mecanismo de acción específico. Rotando o mezclando en una aplicación, herbicidas con diferentes mecanismos de acción se puede disminuir la presión de selección hacia mutantes con resistencia a cierto herbicida y, así, retrasar la evolución de resistencia (Gressel y Segel, 1990; Beckie, 2006). Los herbicidas pueden mezclarse y aplicarse juntos, aplicarse como post emergentes secuenciados dentro de un mismo cultivo, un premergente puede ir seguido por otro herbicida en postemergencia, y finalmente se pueden alternar herbicidas en años diferentes y en diferentes cultivos en una rotación (Walsh y Powles, 2007; Vencill *et al.,* 2012). La idea es que los mutantes (biotipos) que sobreviven a la ac-

ción selectiva de un herbicida sean controlados por el otro herbicida y viceversa para que ambos componentes de una mezcla o secuencia de herbicidas se protejan el uno al otro. Pero para que esto ocurra, ambos herbicidas deben ser efectivos sobre la misma especie y su persistencia en el suelo debe ser similar. De otra forma, la selección desigual por uno de los componentes seleccionará por resistencia si la mezcla o secuencia se aplica en forma recurrente (Gressel y Segel, 1990). La probabilidad de seleccionar mutantes dobles con resistencia por sitio de acción a ambos herbicidas es real, pero muy baja (Wrubel y Gressel, 1994). La aplicación en secuencia permite controlar escapes al primer herbicida y también controla malezas de emergencia tardía; pero el segundo herbicida ejercerá presión de selección por resistencia sobre estas últimas, lo que no ocurre con el empleo de mezclas cuando la acción de ambos herbicidas es simultánea. Trabajos recientes y predicciones con modelos de simulación sugieren que las mezclas de herbicidas con diferentes mecanismos de acción serían más eficientes en retardar la resistencia que el empleo alternado de herbicidas en años sucesivos (Diggle *et al.,* 2003; Beckie y Reboud, 2009). Si una población ya es resistente a un componente de una mezcla, el uso repetido de esa mezcla seleccionará por resistencia al segundo componente y el resultado será la resistencia múltiple a ambos herbicidas. Sin embargo, muchas veces puede resultar práctico el uso de tales mezclas cuando el componente para el cual ya existen plantas resistentes es de amplio espectro y muy efectivo con la mayoría de las malezas presentes. En tal caso, deberá emplearse en secuencia otro herbicida (o mezcla de herbicidas) con modo de acción diferente que elimine todos los posibles sobrevivientes al tratamiento inicial.

- Cuando la resistencia se debe a mecanismos ajenos al sitio de acción. Cuando, como se explica anteriormente, la resistencia es conferida por una alteración en el sitio de acción específico del herbicida, tal que la planta pierde vulnerabilidad hacia éste, podemos manejar el problema alternando con otro herbicida efectivo sobre esa misma maleza pero cuya letalidad se basa en un mecanismo de acción diferente. Sin embargo, la existencia de mecanismos ajenos al sitio de acción y multifactoriales involucrados en resistencia cruzada y múltiple (por definiciones y ejemplos consultar Gressel, 2002) nos indica que alternar herbicidas con mecanismos de acción diferentes no es suficiente para manejar resistencia, a menos que éstos sean además inactivados en la planta mediante rutas metabólicas o mecanismos secuestrantes diferentes. El uso de herbicidas puede seleccionar biotipos que tengan sobreexpresada una red de mecanismos de tolerancia a diversos estreses y que les confieran resistencia multifactorial a una plétora imprevisible de herbicidas (Fischer *et al.,* 2000a; Fischer *et al.,* 2000b; Osuna *et al.,* 2002; Fischer *et al.,* 2004; Yun *et al.,* 2005; Ruiz-Santaella *et al.,* 2006; Bakkali *et al.,* 2007; Yasuor *et al.,* 2008; Yasuor *et al.,* 2009; Yasuor *et al.,* 2010; Yasuor *et al.,* 2011). En tal caso, las mezclas o secuencias de herbicidas diferentes podrían incluso acelerar la selección por resistencia si las enzimas de degradación o los mecanismos de secuestro son comunes entre ellos o se sobreregulan en forma coordinada (Yun *et al.,* 2005; Gressel, 2009; Yasuor *et al.,* 2011). De todas formas, rotar o mezclar herbicidas sigue siendo un componente válido para el manejo integrado de la resistencia. En primer lugar, porque consigue retrasar la evolución de resistencia por sitio de acción y en segundo lugar, porque no siempre herbicidas que se inactivan por el mismo proceso lo hacen involucrando las mismas proteínas y genes.

- Cuando la resistencia resulta del efecto combinado de varios genes. La resistencia por sitio acción es normalmente gobernada por genes mayores de herencia monogénica que suelen conferir elevados niveles de resistencia (la excepción a esto es la resistencia de sitio acción al glifosato). Su evolución se acelera cuando el herbicida se usa a dosis elevadas, dado que prácticamente todos los individuos que logren sobrevivir serán portadores del gene de resistencia.

Pero dosis sub-letales permitirán la supervivencia de una fracción menor de individuos susceptibles que producirán semilla y diluirán el avance de la selección por resistencia (baja presión de selección). Lo contrario puede ocurrir si se trata de especies de fecundación cruzada y la resistencia está controlada por varios genes como suele ser el caso de resistencia ajena al sitio de acción o multifactorial (Busi *et al.,* 2011). Dosis bajas de herbicida que matan a la mayoría de los individuos pero permiten la supervivencia de algunos permite que éstos intercambien y acumulen genes de resistencia en genotipos individuales mediante hibridación y recombinación génica. Así aumenta, con el tiempo, el nivel de resistencia en ciertos genotipos, cuya frecuencia se incrementa bajo selección con herbicida (Gressel, 2002; Neve y Powles, 2005; Busi y Powles, 2009; Gressel, 2009; Busi y Powles, 2011; Manalil *et al.,* 2011). En el caso de resistencias fuera del sitio de acción, es posible también que esta acumulación de genes menores resulte en la aparición de resistencia cruzada a nuevos herbicidas (Manalil *et al.,* 2011). Dosis subletales pueden también causar estrés e incrementar la frecuencia de mutaciones adaptativas capaces de conferir resistencia (Gressel, 2011). De esta manera, la estrategia de manejo de resistencia más adecuada sería la de utilizar las dosis de etiqueta más efectivas, evitar dosis bajas y eliminar plantas sobrevivientes con métodos de control alternativo. Dosis bajas son también aquellas que resultan de aplicaciones foliares tardías, cuando las malezas están demasiado grandes, o cuando los residuos de herbicidas aplicados al suelo se desvanecen y malezas de emergencia tardía sobreviven a su acción.

MEZCLAS SINÉRGICAS Y RESISTENCIA CRUZADA NEGATIVA

Un agente sinérgico es un compuesto que potencia la acción de un herbicida sin necesariamente tener propiedades herbicidas de por sí. Estos compuestos permiten en ciertos casos controlar biotipos resistentes sin causar daño al cultivo, incluso utilizando dosis menores del herbicida, lo cual permite reducir la presión de selección a genes de resistencia en la población. Los agentes sinérgicos suelen inhibir en la maleza, pero no en el cultivo, algún sistema metabólico de detoxificación que opera como mecanismo de resistencia (Valverde *et al.,* 2000; Fischer *et al.,* 2004). Ciertas mezclas de herbicidas, cuya eficacia es mayor que el efecto aditivo de sus componentes, pueden controlar al biotipo resistente y además permitir el empleo de dosis menores que disminuyen la presión de selección por resistencia (Gressel, 1990; Woodyard *et al.,* 2009). En ciertos casos se ha demostrado que biotipos resistentes a un herbicida pueden ser particularmente sensibles, incluso más susceptibles que los biotipos normales, a otros herbicidas. Es lo que se llama resistencia cruzada negativa. La detección de resistencia cruzada negativa permite el control selectivo de biotipos resistentes con dosis herbicídicas muy bajas que ejercen despreciable presión de selección por resistencia y permiten además reducir la carga ambiental de pesticidas. Tal fue el caso del control de biotipos de *Echinochloa crus-galli* y *Conyza canadensis* resistentes a atrazina para los cuales fue posible encontrar 18 compuestos diferentes que exhibían resistencia cruzada negativa y podían utilizarse en concentraciones entre 0,03 y 0,67 de la concentración necesaria para controlar un biotipos susceptible (Gadamski *et al.* 2000). La detección de resistencia cruzada negativa representa un herramienta muy útil para prevenir resistencia o para retardarla incluso una vez que ésta ya ha evolucionado.

CULTIVARES RESISTENTES A HERBICIDAS

Variedades de cultivos resistentes a herbicidas. Se han desarrollado variedades comerciales de diversas especies cultivadas con resistencia a herbicidas (Green, 2009; Green, 2012; Vencill *et al.,* 2012). En muchos casos, se trata de herbicidas no selectivos, con baja residualidad en el suelo y con bajo riesgo de evolución de resistencia, como

son el glifosato y el glufosinato. En otros casos, los cultivos pueden ser resistentes a herbicidas para los que las malezas pueden evolucionar resistencia con mayor facilidad, como es el caso de resistencia a herbicidas inhibidores de la enzima ALS. Los genes de resistencia pueden insertarse como transgenes mediante ingeniería genética o resultar de mutaciones inducidas. La técnica se adapta especialmente para la agricultura de mínima o cero labranza y es muy atractiva pues simplifica las operaciones del productor, lo que desafortunadamente conduce al uso año tras año de un mismo herbicida sobre el mismo lugar. Esto conlleva un elevado riesgo de evolución de resistencia o de cambios florísticos en las poblaciones de malezas hacia especies más difíciles de controlar con esos herbicidas. Nuevas generaciones de cultivares herbicida-resistentes incluirán genes de resistencia para más de un herbicida en una misma variedad, lo que permitirá alternar o combinar herbicidas con diferentes mecanismos de acción a fin de retardar la evolución de resistencia (Green, 2012).

Cuando la variedad herbicida-resistente pertenece a una especie cultivada capaz de hibridar con una maleza, siempre existe la probabilidad de transferencia genética (flujo de genes) de la resistencia del cultivo hacia la maleza en caso que los genes puedan ser transferidos por polen. Es posible diseñar estrategias que mitiguen este flujo de genes, tales como distancias de aislamiento, restricciones a replantar sobre la misma área, y proscripción del uso repetido de esta tecnología en un mismo lugar (Al-Ahmad y Gressel, 2006). Sin embargo, suele ser difícil evitar por completo el flujo de genes de resistencia hacia una maleza que hibrida con el cultivar resistente. Debemos integrar esta tecnología con otras técnicas y otros herbicidas para el manejo de la evolución de resistencia (Olofsdotter *et al.,* 2000; Gressel y Valverde, 2009). La evolución de malezas resistentes en cultivos herbicida-resistentes limita seriamente el número de herramientas químicas, lo cual es grave dado el limitado número de mecanismos de acción diferentes y la escasa oferta de nuevos compuestos (Vencill *et al.,* 2012). El empleo de cultivares resistentes a herbicidas no selectivos de amplio espectro ha desincentivado el uso de herbicidas con diversos mecanismos de acción. Estos herbicidas de amplio espectro resultan sumamente útiles en el control de malezas problemáticas y de biotipos resistentes a otros herbicidas.

LAS DECISIONES LAS TOMA EL PRODUCTOR

Es importante lograr a nivel del productor una real conciencia del rol que juega la presión de selección del herbicida en la evolución de malezas resistentes y apreciar cómo el uso masivo de un herbicida empleado como única herramienta conduce la evolución de resistencia en las vastas áreas bajo labranza cero (Owen *et al.,* 2011; Wilson *et al.,* 2011). No siempre se reconoce que la diversificación en el uso de herbicidas puede ser una táctica simple y económicamente viable en el manejo de resistencia. Como lo sugiere la presencia de mecanismos de resistencia cruzada, resistencia múltiple y aquellos ajenos al sitio de acción, resultaría poco probable ser exitosos en el control de biotipos resistentes sólo en base a alternar herbicidas. Razón por la cual, prácticas agronómicas adicionales como la rotación y la labranza mejoran la eficacia del manejo de la resistencia; aunque esto no siempre resulte económicamente atractivo en el corto plazo (Wilson *et al.,* 2011). Los productores a menudo atribuyen la problemática de malezas y su resistencia a factores más o menos inevitables que están fuera de su control (Wilson *et al.,* 2008; Wilson *et al.,* 2011). Sin embargo, las decisiones finales sobre el control de malezas en un predio las toma el productor, y la única forma de influir sobre esas decisiones es mediante su capacitación. La labor del extensionista es conocer las perspectivas del productor para poder capacitarlo con base científica y así facilitar su acción proactiva en la selección económica de tácticas agronómicas de prevención y manejo de resistencia (Owen *et al.,* 2011; Weirich *et al.,* 2011).

BIBLIOGRAFÍA

AL-AHMAD, H.; GRESSEL, J. 2006. Mitigation using a tandem construct containing a selectively unfit gene precludes establishment of Brassica napus transgenes in hybrids and backcrosses with weedy *Brassica rapa*. Plant Biotechnology Journal v. 4 n, 1, p 23-33.

BAKKALI, Y.; RUIZ-SANTAELLA, J.P.; OSUNA, M.D.; WAGNER, J.; FISCHER, A.J.; DE PRADO, R. 2007. Late watergrass (*Echinochloa phyllopogon*): Mechanisms involved in the resistance to fenoxaprop-p-ethyl. Journal of Agricultural and Food Chemistry v. 55, n. 10, p. 4052-4058.

BECKIE, H.J. 2006. Herbicide-resistant weeds: Management tactics and practices. Weed Technology, v. 20, n. 3, p. 793-814.

BECKIE, H.J.2011. Herbicide-resistant weed management: focus on glyphosate. Pest Management Science, v. 67, n. 9, p.1037-1048.

BECKIE, H.J.; REBOUD, X. 2009. Selecting for Weed Resistance: Herbicide Rotation and Mixture. Weed Technology, v. 23, n. 3, p. 363-370.

BOSNIÆ, A.È.; SWANTON, C.J. 1997. Economic decision rules for postemergence herbicide control of barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) in corn (*Zea mays*). Weed Science, v. 45, n. 4, p. 557-563.

BUSI, R.; POWLES, S.B. 2009. Evolution of glyphosate resistance in a *Lolium rigidum* population by glyphosate selection at sublethal doses. Heredity, v. 103, p. 318-325.

BUSI, R.; POWLES, S.B. 2011. Reduced sensitivity to paraquat evolves under selection with low glyphosate doses in *Lolium rigidum*. Agronomy for Sustainable Development, v. 31, p. 525–531.

BUSI, R.; VILA-AIUB, M.M.; POWLES, S.B. 2011. Genetic control of a cytochrome P450 metabolism-based herbicide resistance mechanism in *Lolium rigidum*. Heredity, v. 106, p. 817-824.

DIGGLE, A.J.; NEVE, P.; SMITH, F.P. 2003. Herbicides used in combination can reduce the probability of herbicide resistance in finite weed populations. Weed Research, v. 43, n. 5, p. 371-382.

FISCHER, A.; LOZANO, J.; RAMIREZ, A.; SANINT, L. 1993.Yield loss prediction for integrated weed management in direct seeded rice. International Journal of pest management, v. 39, n. 2, p. 175-180.

FISCHER, A.J.; ATEH, C.M.; BAYER, D.E.; HILL, J.E. 2000a. Herbicide-resistant Echinochloa oryzoides and E-phyllopogon in California *Oryza sativa* fields. Weed Science, v. 48, n. 2, p. 225-230.

FISCHER, A.J.; BAYER, D.E.; CARRIERE, M.D.; ATEH, C.M.; YIM, K.O. 2000b. Mechanisms of resistance to bispyribac-sodium in an *Echinochloa phyllopogon* accession. Pesticide Biochemistry and Physiology, v. 68, n. 3, p. 156-165, 2000b.

FISCHER, A.J.; CHEETHAM, D.P.; VIDOTTO, F.; DE PRADO, R. 2004. Enhanced effect of thiobencarb on bispyribac sodium control of *Echinochloa phyllopogon* (stapf) koss. In California rice (*Oryza sativa* l.). Weed biology and management, v. 4, n. 4, p. 206-212.

FISCHER, A.J.; RAMIREZ, H.V.; GIBSON, K.D.; DA SILVEIRA PINHEIRO. B. 2001. Competitiveness of semidwarf upland rice cultivars against palisadegrass (*Brachiaria brizantha*) and signalgrass (*B. decumbens*). Agron. J. v. 93, p. 967-973.

GADAMSKI, G.; CIARKA, D.; GRESSEL, J.; GAWRONSKI, S.W. 2000. Negative cross-resistance in triazine-resistant biotypes of *Echinochloa crus-galli* and *Conyza canadensis*. Weed Science, v. 48, n. 2, p. 176-180.

GEALY, D.R.; ESTORNINOS, J.R., L.E.; GBUR, E.E.; CHAVEZ, R.S.C. 2005. Interference interactions of two rice cultivars and their F3 cross with barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) in a replacement series study. Weed Science, v. 53, n. 3, p. 323-330.

GIBSON, K.; FISCHER, A.J. Competitiveness of rice cultivars as a tool for crop-based weed management. in Inderjit ed. Weed Biology and Management, Kluver, Dordrecht, The Netherlands. p. 518-537.

GIBSON, K.; FISCHER, A.; FOIN, T.; HILL, J. 2002. Implications of delayed Echinochloa spp. germination and duration of competition for integrated weed management in water seeded rice. Weed Research, v. 42, n. 5, p. 351-358.

GODDARD, R.J.; PANNELL, D.J.; HERTZLER, G. 1996. Economic evaluation of strategies for management of herbicide resistance. Agric. Syst., v. 51, n. 3, p. 281-298.

GREEN, J.M. 2009. Evolution of glyphosate-resistant crop technology. Weed Science, v. 57, n. 1, 108-117.

Green, J.M. 2012. The benefits of herbicide resistant crops. Pest Management Science, v. 68, p. 1323-1331.

GRESSEL, J. 1990. Synergizing herbicides. Reviews of Weed Science, v. 5, p. 49-82.

GRESSEL, J. 2002. Molecular biology of weed control, London, Taylor y Francis, 504p.

GRESSEL, J. 2009. Evolving understanding of the evolution of herbicide resistance. Pest Management Science, v. 65, v. 11, 1164-1173.

GRESSEL, J. 2011. Low pesticide rates may hasten the evolution of resistance by increasing mutation frequencies. Pest Management Science, v. 67, p. 253–257.

GRESSEL, J.; SEGEL, L.A. 1990. Modeling the effectiveness of herbicide rotations and mixtures as strategies to delay or preclude resistance. Weed Technology, v. 4, n.1, p. 186-198.

GRESSEL, J.; VALVERDE, B.E. 2009. A strategy to provide long-term control of weedy rice while mitigating herbicide resistance transgene flow, and its potential use for other crops with related weeds. Pest Management Science, v. 65, n. 7, p. 723-731.

HALL, M.R.; SWANTON, C.J.; ANDERSON, G.W. 1992. The critical period of weed control in grain corn (*Zea mays*). Weed Science, v. 40, n. 3, p. 441-447.

HANSON, D.E.; BALL, D.A.; MALLORY-SMITH, C.A. 2002. Herbicide resistance in jointed goatgrass (*Aegilops cylindrica*): Simulated responses to agronomic practices. Weed Technology, v. 16, n. 1, p. 156-163.

JASIENIUK, M.; BRULÉ-BABEL, A.L.; MORRISON, I.N. The evolution and genetics of herbicide resistance in weeds. Weed Science, v. 44, p.176-193, 1996.

JONES, R.E.; MEDD, R.W. 2005. A methodology for evaluating risk and efficacy of weed management technologies. Weed Science, v. 53, n. 4, p. 505-514.

KNEZEVIC, S.Z.; EVANS, S.P.; BLANKENSHIP, E.E.; VAN ACKER, R.C.; LINDQUIST, J.L. 2002. Critical period for weed control: the concept and data analysis. Weed Science, v. 50, n. 6, p. 773-786, 2002.

L**EMERLE, D.; VERBEEK, B.; ORCHARD, B.** 2000. Ranking the ability of wheat varieties to compete with *Lolium rigidum*. Blackwell Science Ltd. Weed Research, v. 41, p.197-209.

LINQUIST, B.; FISCHER, A.; GODFREY, L.; GREER, C.; HILL, J.; KOFFLER, K.; MOECHING, M.; MUTTERS, R.; VAN KESSEL, C. 2008. Minimum tillage could benefit California rice farmers. California Agriculture, v. 62, p. 24-29.

MANALIL, S.; BUSI, R.; RENTON, M.; POWLES, S.B.2011. Rapid evolution of herbicide resistance by low herbicide dosages. Weed Science, v. 59, n. 2, p. 210-217.

NEVE, P.; DIGGLE, A.J. SMITH, F.P.; POWLES, S.B. 2003. Simulating evolution of glyphosate resistance in *Lolium rigidum* II: past, present and future glyphosate use in Australian cropping. Weed Research, v. 43, n. 6, p. 418-427.

NEVE, P.; POWLES, S. 2005. Recurrent selection with reduced herbicide rates results in the rapid evolution of herbicide resistance in *Lolium rigidum*. Theoretical and Applied Genetics, v. 110, n. 6, p. 1154-1166.

NEVE, P.; VILA-AIUB, M.; ROUX, F. 2009. Evolutionary-thinking in agricultural weed management. New Phytologist, v. 184, p. 783–793.

NORSWORTHY, J.K.; WARD, S.M.; SHAW, D.R.; LLEWELLYN, R.S.; NICHOLS, R.L., WEBSTER T.M., BRADLEY K.W., FRISVOLD G., POWLES S.B., BURGOS N.R. 2012. Reducing the risks of herbicide resistance: best management practices and recommendations. Weed Science, v. 60, n. sp1, p. 31-62.

OLOFSDOTTER, M.; ANDERSEN, S. 2004. Improvement of allelopathy in crops for weed management-possibilities, breeding, strategies and tools. in Inderjit (Ed.) Weed Biology and Management, Kluver, Dordrecht, The Netherlands, p. 317-328.

OLOFSDOTTER, M.; VALVERDE, B.E.; MADSEN, K.H. 2000. Herbicide resistant rice (*Oryza sativa* L.): Global implications for weedy

rice and weed management. Annals of Applied Biology, v. 137, n. 3, p. 279-295.

OSUNA, M.D.; VIDOTTO, F.; FISCHER, A.J.; BAYER, D.E.; DE PRADO, R.; FERRERO, A. 2002. Cross-resistance to bispyribac-sodium and bensulfuron-methyl in *Echinochloa phyllopogon* and *Cyperus difformis*. Pesticide Biochemistry and Physiology, v. 73, n.1, p. 9-17.

OWEN, M.D.K.; YOUNG, B.G.; SHAW, D.R.; WILSON, R.G.; JORDAN, D.L.; DIXON, P.M.; WELLER, S.C. 2011. Benchmark study on glyphosate-resistant crop systems in the United States. Part 2: Perspectives. Pest Management Science, v. 67, n. 7, p. 747-757.

PÉREZ DE VIDA, F.B.; LACA, E.A.; MACKILL, D.J.; FERNÁNDEZ, G.M.; FISCHER, A.J. 2006 Relating rice traits to weed competitiveness and yield: a path analysis. Weed Science, v. 54, p.1122-1131.

PITTELKOW, C.; FISCHER, A.; MOECHNIG, M.; HILL, J.; KOFFLER, K.; MUTTERS, R.; GREER, C.; CHO, Y.; VAN KESSEL, C.; LINQUIST, B. 2012. Agronomic productivity and nitrogen requirements of alternative tillage and crop establishment systems for improved weed control in direct-seeded rice. Field Crops Research, v. 130, p. 128-137.

RUIZ-SANTAELLA, J.; DE PRADO, R.; WAGNER, J.; FISCHER, A.; GERHARDS, R. 2006. Resistance mechanisms to cyhalofop-butyl in a biotype of *Echinochloa phyllopogon* (Stapf) Koss. from California. Zeitschrift fur pflanzenkrankheiten und pflanzenschutz-sonderheft, v. 20, n. Sonderheft XX, p. 95-100, 2006.

TSUJI, R.; FISCHER, A.J.; YOSHINO, M.; ROEL, A.; HILL, J.E.; YAMASUE, Y. 2003. Herbicide-resistant late watergrass (*Echinochloa phyllopogon*): similarity in morphological and amplified fragment length polymorphism traits. Weed Science, v. 51, p. 740-747.

TUESCA, D.; NISENSOHN, L. 2001.Resistencia de Amaranthus quitensis a imazetapir y clorimurón-etil. Pesq. Agropec. Bras., v. 36, n. 4, p. 601-606.

VALVERDE, B.E.; RICHES, C.R.; CASELEY, J. 2000. Prevention and management of herbicide resistant weeds in rice: Experiences from Central America with *Echinochloa colona*. San José, Costa Rica: Cámara de Insumos Agropecuarios. 123 p.

VENCILL, W.; NICHOLS, R.L.; WEBSTER, T.M.; SOTERES, J.; MALLORY-SMITH, C.; BURGOS, N.R.; JOHNSON, W.G.; MCCLELLAND, M.R. 2012. Herbicide resistance: Toward an understanding of resistance development and the impact of herbicide-resistant crops. Weed Science, v. 60, n. sp1, p. 2-30.

VILA-AIUB, M.M.; NEVE, P.; POWLES, S.B. 2009. Evidence for an ecological cost of enhanced herbicide metabolism in *Lolium rigidum*. Journal of Ecology, v. 97, p. 772–780.

WALSH, M.J.; HARRINGTON, R.B.; POWLES, S.B. 2012. Harrington seed destructor: a new nonchemical weed control tool for global grain crops. Crop Science, v. 52, n. 3, p. 1343-1347.

WALSH, M.J.; MAGUIRE, N.; POWLES, S.B. 2009. Combined effects of wheat competition and 2,4-D amine on phenoxy herbicide resistant *Raphanus raphanistrum* populations. Weed Research, v. 49, n. 3, p. 316-325.

WALSH, M.J.; POWLES, S.B. 2007. Management strategies for herbicide-resistant weed populations in Australian dryland crop production systems. Weed Technology, v. 21, n. 2, p. 332-338.

WEIRICH, J.W.; SHAW, D.R.; OWEN, M.D.K.; DIXON, P.M. WELLER, S.C.; YOUNG, B.G.; WILSON, R.G.; JORDAN, D.L. 2011. Benchmark study on glyphosate-resistant cropping systems in the United States. Part 5: Effects of glyphosate-based weed management programs on farm-level profitability. Pest Management Science, v. 67, n. 7, p. 781-784.

WILSON, R.G.; YOUNG, B.G.; MATTHEWS, J.L.; WELLER, S.C.; JOHNSON, W.G.; JORDAN, D.L.; OWEN, M.D.K.; DIXON, P.M.; SHAW, D.R. 2011. Benchmark study on glyphosate-resistant cropping systems in the United States. Part 4: Weed management practices and effects on weed populations and soil seedbanks. Pest Management Science, v. 67, n. 7, p. 771-780, 2011.

WILSON, R.S.; TUCKER, M.A.; HOOKER, N.H.; LEJEUNE, J.T.; DOOHAN, D. 2008 Perceptions and beliefs about weed management: perspectives of Ohio grain

and produce farmers. Weed Technology, v. 22, n. 2, p. 339-350.

WOODYARD, A.J.; HUGIE, J.A.; RIECHERS, D.E. 2009. Interactions of mesotrione and atrazine in two weed species with different mechanisms for atrazine resistance. Weed Science, v. 57, n. 4, p. 369-378.

WRUBEL, R.P.; GRESSEL, J. 1994. Are herbicide mixtures useful for delaying the rapid evolution of resistance - a case-study. Weed Technology, v. 8, n. 3, p. 635-648.

YASUOR, H.; MILAN, M.; ECKERT, J.W.; FISCHER, A.J. 2011. Quinclorac resistance: a concerted hormonal and enzymatic effort in *Echinochloa phyllopogon*. Pest Management Science, v. 68, n. 1, p. 108-115.

YASUOR, H.; OSUNA, M.D.; ORTIZ, A.; SALDAIÌN, N.E.; ECKERT, J.W.; FISCHER, A.J. 2009. Mechanism of resistance to penoxsulam in late watergrass [*Echinochloa phyllopogon* (Stapf) Koss.]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 57, n. 9, p. 3653-3660.

YASUOR, H.; TENBROOK, P.L.; TJEERDEMA, R.S.; FISCHER, A.J. 2008. Responses to clomazone and 5 ketoclomazone by Echinochloa phyllopogon resistant to multiple herbicides in Californian rice fields. Pest Management Science, v. 64, n. 10, 1031-1039.

YASUOR, H.; ZOU, W.; TOLSTIKOV, V.V.; TJEERDEMA, R.S.; FISCHER, A.J. 2010. Differential oxidative metabolism and 5-ketoclomazone accumulation are involved in *Echinochloa phyllopogon* resistance to clomazone. Plant Physiology, v. 153, n. 1, p. 319-326.

YUN, MS.; YOGO, Y.; MIURA, R.; YAMASUE, Y.; FISCHER, A.J. 2005. Cytochrome P-450 monooxygenase activity in herbicide-resistant and -susceptible late watergrass (*Echinochloa phyllopogon*). Pesticide Biochemistry and Physiology, v. 83, n. 2-3, p. 107-114.