

Arroz resistente a herbicidas: oportunidades y riesgos

Bernal E. Valverde¹

A pesar de que América Latina sólo contribuye con el 3,8% de la producción mundial de arroz, este cultivo es de vital importancia para la región, que produce 23 millones de toneladas de grano, en un área de 6,4 millones de ha. Los mayores productores son: Brasil (3,7 millones ha, 11,2 millones ton), Colombia (440.000 ha, 2,1 millones ton) y Perú (300.000 ha, 1,7 millones ton); Ecuador que dedica al cultivo un área mayor que la de Perú (380.000 ha), produce 1,5 millones de ton (FAO 2001).

Las malezas son una de las mayores limitantes del cultivo y, en condiciones extremas, pueden causar la pérdida total de la cosecha. Entre las especies más importantes de malezas se encuentran varias gramíneas, en especial *Echinochloa colona* y *E. crus-galli*, especies del género *Oryza* (comúnmente denominadas arroz rojo o arroz contaminante), *Ischaemum rugosum* y otras. Los productores dependen del uso de herbicidas para controlar selectivamente las gramíneas del cultivo, con excepción de las congéneres del arroz, que toleran los productos de uso convencional.

En los últimos años, la industria de agroquímicos ha desarrollado y comercializado cultivos resistentes a herbicidas que, en principio, permiten mejorar el control de malezas, disminuir el empleo de herbicidas y sustituir los productos convencionales por otros más eficientes y con mejor perfil ambiental. Las variedades de arroz resistentes a herbicidas son una opción para el manejo de malezas del género *Oryza* y para el control de especies que han evolucionado resistencia a los herbicidas convencionales.

Sin embargo, el uso de esta tecnología no está exenta de riesgos. Algunos de ellos se asocian a los efectos que podrían tener los cultivos resistentes a herbicidas sobre la biodiversidad de América Latina (Riches & Valverde 2001). En el caso del arroz, las mayores preocupaciones agronómicas se refieren a la posibilidad de que los genes de resistencia se transfieran a las malezas del género *Oryza*, a la dificultad de controlar el arroz voluntario resistente a herbicidas y al riesgo de seleccionar nuevas malezas resistentes; todos estos aspectos han sido discutidos a nivel global (Olofsdotter et al. 2000). En esta ponencia se analiza el empleo de variedades de arroz resistentes a herbicidas desde una perspectiva latinoamericana.

Especies del género *Oryza* en América Latina.

El arroz comercial que se cultiva en América Latina - y que predomina en el resto del mundo - es *Oryza sativa* L.; en África occidental se cultiva otra especie domesticada, *O. glaberrima* Steud. Hay más de 20 especies silvestres del género *Oryza*; la mitad son tetraploides y las restantes, así como las dos especies cultivadas, son diploides (Brar & Khush 1997, Khush 1997). Hasta la fecha, se han identificado 10 genomas en el género *Oryza*, cuyas especies se agrupan según su afinidad genética en cuatro complejos: Sativa, Oficialis, Ridley y Meyeriana. Algunas especies silvestres son objeto de controversia taxonómica, especialmente en virtud de la nueva información proveniente de estudios basados en la biología molecular. Tres especies silvestres no pertenecen a ningún complejo: *O. brachyantha* A. Chev. et Roehr. [FF], *O. schlechteri* Pilger (2n=48) [HHKK] y *O. neocaledonica* Morat (2n=24) [genoma desconocido] (Aggarwal et al. 1999). Las especies comerciales pertenecen al complejo Sativa (genoma AA). Otras especies con genoma AA son *O. nivara* Sharma et Shasty, *O. rufipogon* Griff. (= *O. perennis* Moench), *O. barthii* A. Chev. (= *O. breviligulata* A. Chev. et Roehr), *O. glumaepatula* Steud., *O. longistaminata* A. Chev. et Roehr. y *O. meridionalis* Ng. Algunas de estas especies silvestres, como *O. rufipogon* y *O. glumaepatula*, pueden cruzarse con el arroz comercial, por lo que pueden emplearse en programas de

¹ Associate Professor. Department of Agricultural Sciences (Weed Science). Royal Veterinary and Agricultural University. Agrovej 10, DK-2630 Taastrup. Denmark. E-mail: bev@kvl.dk

mejoramiento para incorporar características agronómicas deseables, sobre todo, la resistencia a enfermedades (Xiao et al. 1996, Martínez et al. 1998, Brondani et al. 2001). Otras especies con genomas diferentes son difíciles de cruzar con *O. sativa* (Brar & Khush 1997). *O. glumaepatula* es la única especie del complejo *Sativa* oriunda de América, aunque se ha sugerido que evolucionó de ancestros africanos (Aggarwal et al. 1999). Esta especie está muy relacionada con *O. rufipogon*, con la que a veces se confunde, pero la mayoría de las poblaciones de *O. glumaepatula* recolectadas desde América Central hasta la región amazónica corresponden a una especie separada de acuerdo con los estudios morfológicos y genéticos (Juliano et al. 1998, Lu et al. 1998, Buso et al. 2001). La presencia de *O. rufipogon* en América Latina no está bien documentada. Se han recolectado especímenes de herbario en Bolivia, Costa Rica, Ecuador y Venezuela¹ y su presencia como maleza en campos de arroz ha sido confirmada recientemente en Costa Rica (Sittenfeld et al. 2000); se sospecha que algunos biotipos de arroz rojo de Venezuela corresponden a *O. rufipogon*.² La presencia de formas ferales de *O. sativa* (arroz rojo), una de las peores malezas del arroz, tiene una gran importancia agronómica para la región.

Otro complejo importante es el *Officinalis*, que incluye cuatro especies diploides (*O. punctata* Kotschy ex. Steud., $2n = 24$ [BB], *O. officinalis* Wall. ex. Watt [CC], *O. rhizomatis* Vaughan [CC] y *O. australiensis* Domin. [EE]) y siete tetraploides (*O. punctata* Kotschy ex. Steud., $2n = 48$ [BBCC], *O. minuta* J. S. Presl. ex. C. B. Presl. [BBCC], *O. malamphuzhaensis* [BBCC], *O. eichingeri* A. Peter [BBCC], *O. alta* Swallen [CCDD], *O. grandiglumis* (Doell) Prod. [CCDD] y *O. latifolia* Desv. [CCDD]). Recientemente se ha sugerido que el genoma EE no es parte del complejo *Officinalis* y debe considerarse como independiente (Joshi et al. 2000). Los tetraploides CCDD, *O. alta*, *O. grandiglumis* y *O. latifolia* son originarios de América; la última especie es una maleza importante en el cultivo del arroz en América Central y en algunos países de Suramérica. Un estudio reciente sugiere que estas tres especies deben considerarse como una sola (Buso et al. 2001).

Los complejos *Ridleyi* y *Meyeriana* incluyen dos especies cada uno: *O. ridleyi* Hook. y *O. longiglumis* Jansen (ambos HHJJ en *Ridleyi*) y *O. granulata* Nees et Arn. ex. Watt y *O. meyeriana* (Zoll. et Mor. ex Steud.) Baill. (ambos GG en *Meyeriana*).

Las principales especies del género *Oryza* que infestan el arroz en América Latina son *O. sativa* (arroz rojo, arroz contaminante, arrozón, arroz *vermelho*) y *O. latifolia* (arroz pato, arroz contaminante). Las formas ferales de *O. sativa* corresponden a plantas indeseables, fuera de tipo, que desgranar fácilmente sus semillas latentes. Estas plantas son muy similares al arroz comercial y, en algunos casos, se pueden cruzar naturalmente con él. Muchas poblaciones de la maleza *O. sativa* tienen un pericarpo rojo, hojas pubescentes de coloración más clara que el arroz comercial y semillas pubescentes que exhiben latencia (Diarra et al. 1985). En etapas tempranas, la similitud con el cultivo imposibilita el control manual.

En los EE.UU., Noldin (1999a) caracterizó varios ecotipos de la maleza *O. sativa*; la mayoría de ellos correspondía a los tipos ampliamente distribuidos en el sur del país: el de glumas pajizas sin aristas y el de glumas negras con arista. La mayoría de estos biotipos crecieron más, presentaron hojas de tonalidad más clara y produjeron más hijos que las variedades convencionales de arroz; también fueron muy susceptibles a la caída del grano, pero rindieron menos que el arroz comercial, a pesar de producir más panículas. Todos los ecotipos de la maleza produjeron grano de pericarpo rojo. La caracterización molecular de estos biotipos (Vaughan et al. 2001) reveló que, aunque la mayoría de ellos pertenecen a la especie *O. sativa*, otros exhiben cercanía taxonómica con *O. rufipogon* y *O. nivara*.

En aparente contraste con la diversidad de la maleza *O. sativa* en los EE.UU., en varios países latinoamericanos se han reconocido más tipos del arroz maleza. En Colombia, Montealegre y Clavijo (1991b)

¹ Missouri Botanical Garden. 2001. Missouri Botanical Garden's VAST nomenclatural database. Internet available. URL: <http://mobot.mobot.org/W3T/Search/vast.html>. Accessed August 20, 2001.

² Ortiz, A. 2000. Personal Communication. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

definieron cuatro grupos con base en las características del grano, la disposición de los granos en la panícula y su similitud con las variedades comerciales. El arroz maleza tipo "varietal" se asemeja al arroz comercial en la apariencia externa del grano. Los hay de pericarpo rojo y blanco; la mayoría son más precoces y alcanzan mayor altura que el arroz comercial. Los tipos "pipones" tienen un grano abultado, con o sin arista, con pericarpo rojo. Los "mechudos" reciben este nombre porque tienen granos aplanados con arista muy larga y el pericarpo rojo o marrón. El último grupo, los "rayones", tienen glumas de dos colores (moteados), sin aristas, y el pericarpo marrón. Los biotipos difieren en cuanto a la capacidad competitiva con el arroz comercial. De un grupo limitado que se comparó con el comercial, el "pipón desgranador" fue el más competitivo. En ausencia de competencia con el cultivo, el rendimiento por planta del arroz maleza fue superior al de la variedad de referencia (*Oryza* 1), porque produjo un mayor número de granos, aunque de menor peso (Montealegre & Clavijo 1991a).

Los biotipos de la maleza *O. sativa* de Venezuela caracterizados por Ortiz et al. (1999), también presentaron variaciones en el hábito de crecimiento, la capacidad de ahijamiento, el color de las hojas y la caída de semillas (del 17% al 83%). En Brasil (Montagna da Fonseca et al. 1991), Chile (Alvarado & Pedreros 1991), Costa Rica (Sánchez-Olguín 2001) y México (Esqueda 2000), también se han reportado variaciones entre diferentes poblaciones de la maleza con respecto a la presencia o no de aristas y la coloración de las glumas.

Arroz resistente a herbicidas.

Al igual que con otros cultivos, se ha realizado un enorme esfuerzo para incorporar o seleccionar genes de resistencia a herbicidas totales (no selectivos) en el arroz, sobre todo a glifosato, glufosinato de amonio e imidazolinonas. En América Latina se están probando algunas variedades de arroz resistentes a herbicidas (Anon. 1998, 1999; Sissell 1999).

Las variedades resistentes permitirían un control químico "selectivo" de las malezas del género *Oryza*, lo que no se puede lograr fácilmente con las variedades convencionales (Gealy & Dilday 1997). Entre los beneficios adicionales derivados del control de malezas con estos herbicidas totales, están la posible disminución del empleo de herbicidas, la sustitución de herbicidas antiguos por otros menos nocivos y una mayor flexibilidad en el manejo de malezas. Además, sería posible eliminar las malezas que ya han evolucionado resistencia a los herbicidas de uso frecuente en el arroz (Wilcut et al. 1996). Los beneficios económicos derivados de estos cambios en el esquema de producción del arroz aún no han sido estimados.

Una gran parte de la investigación de campo sobre manejo de malezas en arroz resistentes a herbicidas se ha realizado en los EE. UU., con variedades resistentes a glufosinato o imidazolinonas. En Arkansas se logró un control casi total del arroz rojo y otras gramíneas, incluida *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. mediante la aplicación en secuencia de glufosinato (0.42 kg ha⁻¹) en postemergencia temprana y al momento de inundar el cultivo. Se comprobó que hay diferencias en la susceptibilidad al glufosinato de amonio en las variedades transgénicas (Wheeler et al. 1998) y que las condiciones ambientales influyen en la eficacia del herbicida, especialmente, el manejo de la lámina de agua, el estado de crecimiento del cultivo y la adición de otros herbicidas en mezcla con glufosinato (Sankula et al 1997a, 1997b; Griffin et al. 1999; Lanclous et al. 2001).

Las variedades de arroz resistentes a imidazolinonas no son transgénicas (Croughan 1994). Las plantas resistentes a imidazolinonas poseen una enzima, acetolactato sintetasa (ALS), insensible a esos productos, la que fue seleccionada mediante la inducción de mutaciones en semillas y la selección posterior en el campo (Croughan 2001). La enzima ALS es el sitio de acción de estos herbicidas y de otros que inhiben la síntesis de los aminoácidos de cadena ramificada (valina, leucina e isoleucina). Recientemente se han obtenido variedades de arroz que expresan un mecanismo de resistencia a las imidazolinonas basado en la metabolización del herbicida. Este segundo mecanismo se logró seleccionar mediante el cultivo de anteras y retrocruzamientos (Croughan 2001). Las plantas que cuentan con ambos mecanismos resisten dosis más elevadas de imazetapir que las que tienen sólo uno. En pruebas de campo, la aplicación de imazetapir (70 g ha⁻¹) en post-emergencia proveyó excelente control (> 95%) de la maleza *O. sativa*, el que mejoró con una aplicación adicional posterior

(Hackworth et al. 1998). Al igual que con el glufosinato, el mejor control se logra con aplicaciones repetidas de imidazolinonas (Sanders et al. 1998). El imazetapir también controló *Brachiaria platyphylla* (Griseb.) Nash y *E. crus-galli* pero no a *Eclipta prostrata* L. y *Sesbania exaltata* (Raf.) Rydb. ex A W Hill (Dillon et al. 1998).

Existe muy poca información sobre el desarrollo de variedades resistentes a glifosato. Sin embargo, Monsanto ya está probando variedades transgénicas resistentes en campos experimentales en EE.UU (Baldwin 1999)³ y para la siembra directa en Japón (Anon. 1999). No se han publicado los resultados de estos estudios, pero con base en la experiencia de uso de glifosato en otros cultivos transgénicos, puede esperarse que se requiera más de una aplicación del herbicida para lograr un combate efectivo y la supresión consiguiente de la producción de semilla de las malezas del género *Oryza* (Askew et al. 1998).

La liberación comercial de las variedades resistentes a imidazolinonas en EE.UU. estaba prevista para el 2001 (Hackworth et al. 1998, Fairley 1999); sin embargo, se ha pospuesto al menos por un año. El herbicida imazetapir, bajo el nombre de NewPath, es el herbicida imidazolinona que acompañará a la variedad, y ya ha obtenido registros temporales para arroz de la Agencia para la Protección Ambiental (EPA). En la misma forma, se anticipa que las variedades resistentes a glufosinato se comercializarán durante los próximos dos años (Williams et al. 2001). La liberación de estas variedades en América Latina podría realizarse un año después de su introducción comercial en los EE.UU. Se especula con que variedades japónicas resistentes a glifosato podrían ser liberadas en Asia en el 2002.⁴

Riesgos agronómicos del arroz resistente a herbicidas.

La liberación de variedades de arroz resistentes a herbicidas presenta algunos riesgos que merecen ser considerados en detalle. Como ya se adelantó, desde la óptica agronómica, los riesgos principales son: el posible flujo de genes de resistencia a las malezas del género *Oryza*, la dificultad para controlar el arroz voluntario resistente a herbicidas y la posible selección de malezas resistentes.

Movimiento de genes de resistencia a malezas congéneres

La posibilidad de que los genes de resistencia del arroz comercial se transfieran a las malezas del género *Oryza* es mayor con especies del complejo *Sativa*, en particular con la conoespecífica *O. sativa* y las congéneres *O. rufipogon* y *O. glumaepatula*. En términos agronómicos, las malezas *O. sativa* y *O. rufipogon* representan el mayor riesgo, pues, por lo general, *O. glumaepatula* está confinada en sitios distantes de las áreas de siembra; por ejemplo, en Brasil, se encuentra en las regiones amazónica y occidental (Buso et al. 1998). En Costa Rica, sin embargo, se han encontrado poblaciones silvestres de esta especie en humedales localizados al norte del país, cerca de las áreas productoras de arroz (Sittenfeld et al. 2000).

Majumder et al. (1997) documentaron la evolución de tipos intermedios, producto de la introgresión genética de variedades tradicionales de arroz y plantas silvestres de *O. rufipogon* en Manipur, India; la proliferación de estos híbridos prácticamente extinguió la población original de *O. rufipogon*. Akimoto et al. (1999) informaron de un caso similar de erosión genética en Tailandia. Como el arroz cultivado es predominantemente autopolinizado, el flujo de genes es mayor hacia las especies silvestres o las malezas con mayor polinización abierta (Akimoto et al. 1999).

La transferencia de los genes de resistencia dependerá de si las especies compatibles con el arroz están cerca o crecen dentro del cultivo, de la coincidencia de los períodos de floración y de la fertilidad de los híbridos. Muker & Sharma (1991) determinaron que el polen del arroz es capaz de moverse a 31 m, la máxima distancia incluida en su experimento. En los EE.UU., las pruebas de variedades de arroz deben separarse por lo menos tres metros de los campos comerciales, para evitar el cruzamiento (APHIS & USDA 1998). Las siembras

³ <http://www.isb.vt.edu>

⁴ Genetic Resources Action International, <http://www.grain.org/publications/rice-en.cfm>

escalonadas en lotes adyacentes podrían propiciar la hibridación y hacer coincidir la floración del cultivo con la maleza. Experimentalmente, se ha comprobado la hibridación entre el arroz resistente a glufosinato y el arroz maleza; el gene de resistencia es dominante (Sankula et al. 1999).

Langevin et al. (1990) estudiaron la hibridación entre el arroz y la maleza *O. sativa*; el porcentaje varió entre 1% y 52%, dependiendo del cultivar. La hibridación mayor ocurrió en un cultivar de floración tardía (cv. Nortai); en el resto de los cultivares osciló entre el 1% y el 7%. La mayoría de los híbridos fueron más altos, produjeron más hijos y una hoja bandera más larga y ancha que la de los progenitores, posiblemente como resultado del vigor híbrido; también florecieron después que sus padres, lo que, de ser una característica generalizada, podría limitar el retrocruzamiento posterior de los híbridos con la maleza.

En los EE.UU. existe la noción generalizada de que la hibridación entre el arroz comercial y la maleza *O. sativa* es muy limitada, lo que parece fundamentarse en la distinción de unos pocos biotipos de la maleza *O. sativa* en el sur del país. Sobre esta base, las compañías de agroquímicos que desarrollan variedades resistentes a herbicidas planean medidas precautorias para evitar el flujo de los genes de resistencia hacia la maleza. En la sección "Especies del género *Oryza* en América Latina" se establece que, en Latinoamérica, las poblaciones de malezas del género *Oryza* son muy variables. Al respecto, es interesante señalar que en un análisis de malezas del género *Oryza* realizado en EE.UU. con marcadores moleculares (Vaughan et al. 2001), los biotipos pajizos sin arista se agruparon con cultivares de arroz "indica", incluido el cultivar de referencia IR8. El único biotipo pajizo sin arista que presentó afinidad con los cultivares "japónicos" predominantes en EE.UU. fue el MS5, el cual se considera un "varietal" (en la terminología latinoamericana) por su semejanza con los cultivares japónicos tropicales Lemont y Maybelle (Noldin 1999a). Los biotipos aristados con glumas negras, café o doradas presentaron afinidad molecular con varias líneas de *O. nivara* y *O. rufipogon*. Los cultivares de arroz sembrados en los EE.UU. pertenecen al grupo "japónica" (Mackill 1995). Los cultivares de grano corto y mediano que se siembran en California, donde no hay arroz rojo, se clasifican como japónicos templados, mientras que los que se siembran en los estados del sur (de grano largo) son japónicos tropicales. La base genética de la cual derivan los cultivares estadounidenses es limitada (Dilday 1990).

En América Latina, la base genética de las variedades de arroz para zonas irrigadas y de secano favorecido también es limitada (Cuevas-Pérez et al. 1992, Rangel et al. 1996). Sin embargo, una gran proporción de los cultivares deriva de materiales "indica", en particular, de la línea IR8. Una situación similar se presenta con los cultivares de secano, que no tuvieron la influencia de la línea IR8. Brasil siembra cuatro millones de hectáreas de arroz de secano con variedades mejoradas, cuya variabilidad genética se remonta a tan solo seis cultivares tradicionales, uno de las cuales es el progenitor femenino de tres de las cuatro variedades que cubren la mayor parte del área sembrada (Guimarães et al. 1996). Las caracterizaciones de la maleza *Oryza* realizadas en América Latina son predominantemente morfológicas, por lo que no puede establecerse su grado de afinidad con los cultivares. En Brasil, dos biotipos de la maleza presentaron afinidad isoenzimática con los cultivares mejorados para climas templados BRS 6 Chui, BRS 7 Taim y BRS Agrisul (Bonow et al. 2001). Suh et al. (1997) clasificaron 152 poblaciones de la maleza *O. sativa* provenientes de diez países en cuatro grupos, con base en las características morfológicas y fisiológicas, los patrones de isoenzimas y los marcadores moleculares. Un primer grupo, que incluyó poblaciones de la maleza provenientes de EE.UU. y de Brasil (dos de cada país), podría haberse originado en la hibridación entre arceses índica y japónica (cultivados o silvestres), donde el progenitor femenino fue el arroz japónica. Un segundo grupo, proveniente de los países tropicales de Asia, posiblemente resultó de la hibridación entre arceses silvestres y cultivados del tipo índica. Se presume que los otros dos grupos son formas ferales de cultivares japónicos (los encontrados en Bután y Corea) o por hibridación entre arceses cultivados y silvestres japónicos (los obtenidos en China y Corea).

La prevalencia de los híbridos entre el cultivo y la maleza dependerá de su capacidad adaptativa y de sobrevivencia en el campo, incluida su capacidad de persistir en el banco de semillas del suelo. Independientemente de los genes de resistencia, la hibridación del arroz comercial con la maleza *O. sativa* podría aumentar la adaptabilidad de la maleza (Langevin et al. 1990).

Arroz voluntario resistente a herbicidas

El arroz voluntario resistente a herbicidas se puede convertir en un serio problema de manejo en los cultivos en rotación o cuando se cambian las variedades de arroz. En las fincas infestadas con malezas del género *Oryza*, con frecuencia se usa el glifosato antes de la siembra para eliminar las poblaciones de la maleza y del arroz voluntario. Si el arroz voluntario pertenece a una variedad resistente al glifosato, las opciones químicas para el agricultor son muy limitadas. Una situación similar, aunque no tan dramática, podría presentarse en los campos donde el arroz se rota con otros cultivos también resistentes a glifosato, como soya o algodón. Sin embargo, en estos casos, se podrían emplear gramínicas selectivos para eliminar el arroz voluntario.

Selección de malezas resistentes a herbicidas

Las malezas evolucionan resistencia a herbicidas como resultado de la presión de selección que impone el uso continuado de un mismo herbicida o de productos que poseen el mismo mecanismo de acción o de degradación en las plantas. Dos de los herbicidas para los cuales se han desarrollado variedades de arroz resistentes (glifosato y glufosinato) se consideran de bajo riesgo en la evolución de resistencia en malezas. Hasta la fecha, no se han informado casos de resistencia a glufosinato; sin embargo, ya se han documentado varias malezas resistentes a glifosato. Dos de ellas son gramíneas: *Lolium rigidum* Gaudín (Powles et al. 1998) y *Eleusine indica* (L.) Gaertn. (Tran et al. 1999). Por el contrario, los herbicidas inhibidores de la ALS (sulfonilureas, imidazolinonas, pirimidinil benzoicos y triazolpirimidinas) son los que presentan el mayor número de casos de resistencia en el mundo. Sólo en arroz, hay 20 especies resistentes a herbicidas inhibidores de ALS (Valverde & Itoh 2000).

En términos prácticos, la evolución de la resistencia de una maleza al herbicida se percibe como el enriquecimiento paulatino de la población con individuos resistentes. Al principio, la frecuencia de individuos resistentes es muy baja, pero conforme la presión de selección (uso del herbicida) continúa, la proporción de individuos resistentes aumenta a un grado tal que la incapacidad del herbicida para controlar la población resulta notoria. Por lo tanto, es de vital importancia conocer la respuesta de las poblaciones locales de malezas, sobre todo de las del género *Oryza*, a los herbicidas que acompañarán a las variedades de arroz resistentes. Este conocimiento será clave para estimar los riesgos de selección de las poblaciones resistentes y para poder prevenirlas.

Gealy & Dilday (1997) encontraron diferencias en la susceptibilidad del arroz maleza al glufosinato. Sin embargo, en otro estudio realizado en Texas, en el que se escrutaron 59 biotipos de la maleza, no se encontraron diferencias importantes en la respuesta al herbicida. Solo se apreció que algunos biotipos exhibieron cierta tolerancia al glufosinato durante los primeros días posteriores a la aplicación (Hessler et al. 1998). En los EE.UU., Noldin et al. (1999b) estudiaron la respuesta de un grupo de poblaciones de arroz-maleza a varios herbicidas, incluidos imazetapir, glufosinato y glifosato. Las poblaciones respondieron en forma similar al imazetapir y al glifosato, pero una de ellas (designada como TX4) presentó una respuesta diferenciada al glufosinato. Cuando el glufosinato se aplicó a 1,40 kg ha⁻¹ (equivalente al doble de la dosis comercial) en condiciones de invernáculo, aproximadamente el 5% de las plantas tratadas sobrevivió al tratamiento y produjo semillas (a razón de 2.260 semillas por planta). Este porcentaje es muy elevado, si se considera que las poblaciones de la maleza nunca habían estado expuestas al herbicida. En el estudio de Vaughan et al. (2001) se determinó que la población TX4 (gluma negra, aristado) se agrupa con *O. rufipogon* y otros biotipos de morfología similar. Es importante realizar estudios adicionales para determinar si la respuesta disminuida al glufosinato en TX4 se debe a la selectividad entre las especies *O. sativa* y *O. rufipogon* o a la variabilidad intrínseca de las poblaciones de la maleza. En una prueba de eficacia de imazetapir realizada en Arkansas, los investigadores recolectaron semillas de plantas de la maleza *O. sativa* que florecieron simultáneamente con el arroz resistente a imidazolinonas o que sobrevivieron después de la aplicación del herbicida. Algunas de las plantas provenientes de las semillas recolectadas no fueron afectadas por el herbicida. La tasa de sobrevivencia al imazetapir se estimó en un 0.04% a 0.8% (Miller 2001).

Los patrones de uso de herbicidas totales en cultivares de arroz resistentes que se previenen con base en las pruebas de eficacia realizadas pueden aumentar la propensión a la evolución de resistencia en otras malezas. Aunque el glifosato y el glufosinato no son persistentes, la doble aplicación del herbicida en dosis completas en cada ciclo del arroz, podría estar imponiendo una alta presión de selección. Una situación similar se da con las imidazolinonas, algunas de las cuales son bastante persistentes. La presión de selección podría aumentar si se eligen herbicidas de mecanismo de acción similar para controlar especies que escapan a estos herbicidas totales o si se incluyen herbicidas afines a los usados en arroz en los cultivos en rotación.

Comentarios finales

No hay duda de que las variedades de arroz resistentes a herbicidas ofrecen múltiples ventajas al simplificar el manejo de las malezas y permitir el control de especies que no se pueden eliminar con herbicidas de uso convencional. Sin embargo, es importante que su introducción y empleo se realicen después de una valoración exhaustiva de los riesgos que implican. Se ha sugerido que sólo se permita la liberación de variedades resistentes en campos o regiones arroceras donde no hay otras especies del genoma AA (Gressel 1999a); sin embargo, esta limitación no permitiría el empleo de variedades de arroz para eliminar especies nocivas de *Oryza*. Las compañías de agroquímicos deben adaptar sus programas de custodia a las condiciones de la producción de arroz en Latinoamérica y considerar la variabilidad genética y las características bioecológicas de las poblaciones de malezas del género *Oryza* presentes en la región.

Para evitar la persistencia de posibles híbridos entre el arroz resistente a herbicidas y la maleza *Oryza*, se requerirán estrictas medidas de manejo. Entre las que están siendo consideradas por los programas de custodia se puede citar las siguientes: control de las plantas sexualmente compatibles, ya sean silvestres o malezas cercanas al sitio de liberación o siembra de la variedad, vigilancia estricta de la cosecha para minimizar la caída de grano, y control de las plantas voluntarias. Además de las medidas agronómicas, también se ha sugerido el empleo de técnicas biotecnológicas para limitar el flujo de genes de las variedades resistentes a especies compatibles. Entre ellas, se pueden mencionar la colocación del transgene en una línea con esterilidad masculina para la producción de arroz híbrido o en el genoma plasmídico, que se hereda preferencialmente por vía materna. El transgene también podría ligarse a un gene deletéreo para la maleza pero inócuo para el cultivo (Gressel (1999b).

Los modelos también son una herramienta muy útil para definir las áreas de investigación prioritaria para el manejo de las variedades de arroz resistentes a herbicidas y para predecir el tiempo que deberá transcurrir para que se presenten problemas con malezas *Oryza* resistentes a los herbicidas. Un modelo preliminar basado en las condiciones de siembra de arroz de secano favorecido en Costa Rica anticipa que se requerirán de tres a ocho años para que ocurran poblaciones resistentes a glufosinato en monocultivos de arroz como producto del flujo de genes (Madsen et al. 2001).

Literatura citada

- Aggarwal, R. K., D. S. Brar, S. Nandi, N. Huang and G. S. Klush. 1999. Phylogenetic relationships among *Oryza* species revealed by AFLP markers. *Theoretical and Applied Genetics* 98:1320-1328.
- Akimoto, M., Y. Shimamoto and H. Morishima. 1999. The extinction of genetic resources of Asian wild rice, *Oryza rufipogon* Griff.: A case study in Thailand. *Genetic Resources and Crop Evolution* 46:419-425.
- Alvarado, R. y A. Pedreros. 1991. Presencia de arroz rojo en Chile. *Agric. Téc.* 51:374-377.
- Anonymous. 1998. AgrEvo adds Brazil rice breeding. *Chemical Week* 160:7.
- [APHIS] Animal and Plant Health Inspection Service and [USDA] U.S. Department of Agriculture. 1998. Finding of no significant impact. Agrevo USA Company petition 9832901p. Determination of nonregulated status for glufosinate tolerant rice transformation events LLRICE06 and LLRICE62. 31 pp. Internet available: URL hyperlink www.nbiap.vt.edu.
- Anonymous. 1999. Transgenic rice. *Chemical Week* 161:35.
- Askew, S. D., D. R. Shaw and J. E. Street. 1998. Red rice (*Oryza sativa*) control and seedhead reduction with glyphosate. *Weed Technol.* 12:504-506.

- Baldwin, F. L. 1999. The value and exploitation of herbicide-tolerant crops in the US. Proc. Brighton Crop Prot. Conf. Weeds, Vol. 2. pp. 653-660.
- Brar, D. S. and G. S. Khush. 1997. Alien introgression in rice. Plant Molecular Biology 35: 35-47.
- Bonow, S., E. Agustin, D. Fernandes-Franco, José A. Peters e A. L. da Silva-Terres. 2001. Caracterização isoenzimática de genotipos de arroz. Pesq. Agrop. Bras. 36:291-300.
- Brondani, C., R. Pereira, V. Brondani, P. H. Rangel and M. E. Ferreira. 2001. Development and mapping of *Oryza glumaepatula*-derived microsatellite markers in the interspecific cross *Oryza glumaepatula* x *O. sativa*. Hereditas 134:59-71.
- Buso, G. S. C., P. H. Rangel and M. E. Ferreira. 1998. Analysis of genetic variability of South American wild rice populations (*Oryza glumaepatula*) with isozymes and RAPD markers. Molecular Biology 7:107-117.
- Croughan, T. 2001. Herbicide resistant rice. US Patent and Trademark Office. US Patent 6,294,796.
- Croughan, T. 1994. Herbicide resistant rice. US Patent and Trademark Office. US Patent 5,542,822.
- Cuevas-Pérez, F. E., E. P. Guimarães, Luís E. Berrío and D. I. González. 1992. Genetic base of irrigated rice in Latin America and the Caribbean, 1971-1989. Crop Sci. 32:1054-1059.
- Diarra, A., R. J. Smith, Jr. and R. E. Talbert. 1985. Growth and morphological characteristics of red rice (*Oryza sativa*) biotypes. Weed Sci. 33:310-314.
- Dilday, R. H. 1990. Contribution of ancestral lines in the development of new cultivars of rice. Crop Sci. 30:905-911.
- Dillon, T. L., F. L. Baldwin and E. P. Webster. 1998. Weed control in IMI-tolerant rice. Proc. Southern Weed Sci. Soc. 51:268.
- Esqueda, V. A. 2000. Control químico del arroz rojo (*Oryza sativa*) en arroz con herbicidas no selectivos-protectantes a la semilla. Agron. Mesoamericana 11:57-61.
- Fairley, P. 1999. Horizon Ag to market Cyanamid's IMI-tolerant rice. Chemical Week 161:19.
- [FAO] Food and Agriculture Organization. 2001. Statistical database, Agricultural production 2000. Online, Internet, Available <http://apps.fao.org/page/collections?subset=agriculture>.
- Gealy, D. R. and R. H. Dilday. 1997. Biology of red rice (*Oryza sativa* L.) accessions and their susceptibility to glufosinate and other herbicides. Weed Sci. Soc. Am. Abstr. 37:34.
- Guimarães, E. P., J. Borrero and Y. Ospina-Rey. 1996. Genetic diversity of upland rice germplasm distributed in Latin America. Pesq. Agrop. Bras. 31:187-194.
- Gressel, J. 1999a. Herbicide resistant tropical maize and rice: Needs and biosafety considerations. Proc. Brighton Crop Prot. Conf. – Weeds, Brighton, UK, pp. 637-645.
- Gressel, J. 1999b. Tandem constructs: preventing the rise of superweeds. Trends Biotech. 17:361-366.
- Griffin, J. L., S. D. Linscombe and W. Zhang W. 1999. Tolerance of glufosinate-resistant rice lines to glufosinate. Weed Sci. Soc. Am. Abstr. 39:11.
- Hackworth, H. M., L. P. Sarokin, and R. H. White. 1998. 1997-field evaluation of imidazolinone tolerant rice. Proc. South. Weed Sci. Soc. 51:221.
- Hessler, M. D., J. M. Chandler and G. N. McCauley. 1998. Glufosinate sensitivity among Texas red rice (*Oryza sativa*) ecotypes. Proc. Southern Weed Sci. Soc. 51:36.
- Joshi, S. P., V. S. Gupta, R. K. Aggarwal, P. K. Ranjekar and D. S. Brar. 2000. Genetic diversity and phylogenetic relationship as revealed by inter simple sequence repeat (ISSR) polymorphism in the genus *Oryza*. Theor. Appl. Genet. 100:1311-1320.
- Juliano, A. B., M. E. B. Naredo and M. T. Jackson. 1998. Taxonomic status of *Oryza glumaepatula* Steud. I. Comparative morphological studies of New World diploids and Asian AA genome species. Genet. Res. and Crop Evol. 45:197-203.
- Khush, G. S. 1997. Origin, dispersal, cultivation and variation of rice. Plant Molecular Biology 35:25-34.
- Lanclos, D. Y., E. P. Webster, J. L. Griffin and J. M. Ellis. 2001. Response of glufosinate-resistant rice to glufosinate in Louisiana. Weed Science Society of America Abstracts 41:103.
- Langevin, S. A., K. Clay, and J. B. Grace. 1990. The incidence and effects of hybridization between cultivated rice and its related weed red rice (*Oryza sativa* L.). Evolution 44: 1000-1008.
- Lu, B-R, M. E. B. Naredo, A. B. Juliano and M. T. Jackson. 1998. Taxonomic status of *Oryza glumaepatula* Steud. III. Assessment of genomic affinity among AA genome species from the New World, Asia, and Australia. Genet. Res. and Crop Evol. 45: 215-223.
- Mackill, D. J. 1995. Classifying japonica rice cultivars with RAPD markers. Crop Sci. 35:889-894.

- Madsen, K. H., B. E. Valverde and J. E. Jensen. 2001. Risks assessment of herbicide resistant crops: A Latin American perspective using *Oryza sativa* as a model. *Weed Technology*. *In press*.
- Majumder, N. D., T. Ram and A. C. Sharma. 1997. Cytological and morphological variation in hybrid swarms and introgressed population of interspecific hybrids (*Oryza rufipogon* Griff. _ *Oryza sativa* L.) and its impact on evolution of intermediate types. *Euphytica* 94: 295-302.
- Martínez, C. P., J. Tohme, J. López, J. Borrero, S. R. McCouch, W. Roca, M. Chatel y E. Guimares. 1998. Estado actual del mejoramiento del arroz mediante la utilización de especies silvestres de arroz en CIAT. *Agronomía Mesoamericana* 9:10-17.
- Miller, F. 2001. UA researchers study potential risk of herbicide-tolerant red rice. News release March 12, 2001. Communication Services, Arkansas Agricultural Experiment Station. Internet available: <http://www.uark.edu/depts/agripub/Publications/Agnews/agnews01-20.html>.
- Montagna da Fonseca, C., A. L. Terres e A. S. Ribeiro. 1991. Avaliação de características agrônômicas de híbridos entre arroz cultivado e arroz "daninho". *Lav. Arrozeira* 44:13-19.
- Montealegre, F. A. y J. Clavijo. 1991. Tipos de arroz rojo en Colombia. *Fedearroz* 40:16-23.
- Muker, H. S. and H. L. Sharma. 1991. Isolation distance for producing hybrid rice seed. *Int. Rice Res. News* 16:1.
- Noldin, J. A., J. M. Chandler and G. N. McCauley. 1999a. Red rice (*Oryza sativa*) biology. I. Characterization of red rice ecotypes. *Weed Technol.* 13:12-18.
- Noldin, J. A., J. M. Chandler, M. L. Ketchersid and G. N. McCauley. 1999b. Red rice (*Oryza sativa*) biology. II. Ecotype sensitivity to herbicides. *Weed Technol.* 13:19-24.
- Olofsdotter, M., B. E. Valverde and K. H. Madsen. 2000. Herbicide resistant rice (*Oryza sativa* L.): Global implications for weedy rice and weed management. *Annals of Applied Biology* 137:279-295.
- Ortiz, A., L. López y J. Lizaso. 1999. Desarrollo y caracterización morfológica de ecotipos de arroz rojo y cultivares de arroz en Venezuela. *Agron. Trop.* 49:51-67.
- Powles, S. B., D. F. Lorraine-Colwill, J. J. Dellow and C. Preston. 1998. Evolved resistance to glyphosate in rigid ryegrass (*Lolium rigidum*) in Australia. *Weed Sci.* 46:604-607.
- Rangel, P. H. N., E. P. Guimarães e P. C. Ferreira-Neves. 1996. Base genética das cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado do Brasil. *Pesq. Agropec. Bras.* 31:349-357.
- Riches, C. R. and B. E. Valverde. 2001. Agricultural and biological diversity in Latin America: Implications for development, testing and commercialization of herbicide resistant crops. *Weed Technology*. *In press*.

- Sánchez-Olguín, E. 2001. Caracterización morfológica de las poblaciones de arroz maleza en fincas arroceras de Guanacaste y Parita. Tesis Ing. Agr. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos, Escuela de Agronomía, 45 pp.
- Sanders, D. E., R. E. Strahan, S. D. Linscombe and T. P. Croughan. 1998. Control of red rice (*Oryza sativa*) in imidazolinone tolerant rice. Proc. Southern Weed Sci. Soc. 51:36-37.
- Sankula, S., M. P. Braverman, F. Jodari, S. D. Linscombe and J. H. Oard. 1997a. Evaluation of glufosinate on rice (*Oryza sativa*) transformed with the BAR gene and red rice (*Oryza sativa*). Weed Technol. 11:70-75.
- Sankula, S., M. P. Braverman and S. D. Linscombe. 1997b. Response of BAR-transformed rice (*Oryza sativa*) and red rice (*Oryza sativa*) to glufosinate application timing. Weed Technol. 11:303-307.
- Sankula, S., M. P. Braverman and J. H. Oard. 1998. Genetic analysis of glufosinate resistance in crosses between transformed rice (*Oryza sativa*) and red rice (*Oryza sativa*). Weed Technol. 12:209-214.
- Sissell, K. 1999. Brazil burns AgrEvo's rice. Chemical Week 161:37.
- Sittenfeld, A., A. M. Espinoza, M. Muñoz and A. Zamora. 2000. Costa Rica: Challenges and opportunities in biotechnology-biodiversity. In G. J. Persley and M. M. Lantin, eds. Proc. Intl. Conf., Oct 21-22, 1999. Washington, D.C., USA: Consultative Group of International Agricultural Research. pp. 79-89.
- Suh, H. S., Y. I. Sato and H. Morishima. 1997. Genetic characterization of weedy rice (*Oryza sativa* L.) based on morpho-physiology, isozymes and RAPD markers. Theor. Appl. Gen. 94:316-321.
- Tran, M., S. Baerson, R. Brinker, L. Casagrande, M. Faletti, Y. Feng, M. Nemeth, T. Reynolds, D. Rodrigues, D. Shafer, D. Stalker, N. Taylor, Y. Teng and G. Dill. 1999. Characterization of glyphosate resistant *Eleusine indica* biotypes from Malaysia. Proc. Seventeenth Asian-Pacific Weed Sci. Soc. Conf. – Weeds and Environmental impact, Bangkok, Thailand. Vol. 18:527-536.
- Valverde, B. E. and K. Itoh. 2001. World rice and herbicide resistance. In S. B. Powles and D. Shaner, eds. Herbicide resistance and world grains. CRC Press, Boca Raton. pp. 195-249.
- Vaughan, L. K., B. V. Ottis, A. M. Prazak-Harvey, C. Sneller, J. M. Chandler and W. D. Park. 2001. Is all red rice found in commercial rice really *Oryza sativa*? Weed Sci. 49:468-476.
- Wilcut, J. W., H. D. Coble, A. C. York, and D. W. Monks. 1996. The niche for herbicide-resistant crops in U.S. agriculture. In S. O. Duke, ed. Herbicide-resistant crops, agricultural, environmental, economic, regulatory, and technical aspects. CRC Press Inc, Boca Raton. pp. 213-230.
- Williams, B. J., E. P. Webster and R. Strahan. 2001. Advances in rice weed control technology. Louisiana Agriculture 44:4-6.
- Xiao, J., S. Grandillo, S. R. McCouch, S. D. Tanksley, J. Li and L. Yuan. 1996. Genes from wild rice improve yield. Nature 384:223-224.