



**INSTITUTO
NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN
AGROPECUARIA**

URUGUAY



**MANEJO
SUSTENTABLE
DEL ARROZ
RESISTENTE A LAS
IMIDAZOLINONAS**

Diciembre, 2021

**SERIE
TÉCNICA**

260

INIA

MANEJO SUSTENTABLE DEL ARROZ RESISTENTE A LAS IMIDAZOLINONAS

Autores: Néstor Saldain *

Claudia Marchesi **

Juan E. Rosas ***

Ana Laura Pereira ****

Editores: Horacio Saravia *****

Belky Mesones*****

* Ing. Agr. M.Sc. INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz.

** Ing. Agr. M. Sc. PhD. INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz.

*** Lic. M. Sc. Dr. INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz.

**** D. Sc. INIA. Unidad de Semillas.

***** Ing. Agr. M. Sc. INIA. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología.

***** Lic. Bibliotecología, Biblioteca INIA Treinta y Tres.

Título: MANEJO SUSTENTABLE DEL ARROZ RESISTENTE A LAS IMIDAZOLINONAS

Autores: Néstor Saldain
Claudia Marchesi
Juan E. Rosas
Ana Laura Pereira

Editores: Horacio Saravia
Belky Mesones

Serie Técnica N° 260

© 2021, INIA

doi: <http://doi.org/10.35676/INIA/ST.260>

e-ISBN: 978-9974-38-463-7

Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA
Avda. Italia 6201, Edificio Los Guayabos, Parque Tecnológico del LATU, Montevideo, Uruguay.
<http://www.inia.uy>

Quedan reservados todos los derechos de la presente edición. Esta publicación no se podrá reproducir total o parcialmente sin expreso consentimiento del INIA.

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

Integración de la Junta Directiva

Ing. Agr. José Bónica - Presidente

Ing. Agr. Walter Baethgen - Vicepresidente



**Ministerio
de Ganadería,
Agricultura y Pesca**

Ing. Agr. Rafael Secco

Ing. Agr. Martín Gortari



Ing. Agr. Alberto Bozzo

Ing. Agr. Alejandro Henry



CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	1
1 - LA PROBLEMÁTICA DEL ARROZ MALEZA Y SU CONTROL CON EL ARROZ RESISTENTE A LAS IMIDAZOLINONAS	2
ANTECEDENTES	2
Evolución del arroz maleza en el país	2
Control del arroz maleza previo a la nueva tecnología	3
Evolución del área sembrada con arroz resistente a las imidazolinonas	4
ARROZ MALEZA	5
Origen del arroz maleza (arroz rojo o arroz macho)	5
Características que facilitan su persistencia en el agroecosistema del arroz	7
<i>Desgrane de las semillas</i>	7
<i>Color del pericarpio/dormancia de las semillas</i>	7
<i>Color de la cáscara de la semilla</i>	8
El arroz maleza en otros países	8
TECNOLOGÍA CLEARFIELD® EN ARROZ	11
Familia de las imidazolinonas	13
Estructura esquelética de las imidazolinonas asociadas al arroz resistente	13
Modo de acción de las imidazolinonas	13
Comportamiento de las imidazolinonas en el agua y suelo	14
BIBLIOGRAFÍA	16
2 - RECOMENDACIONES PARA UN MANEJO SUSTENTABLE DEL ARROZ RESISTENTE A IMIDAZOLINONAS Y HERRAMIENTAS DE APOYO DISPONIBLES ...	19
INTRODUCCIÓN	19
RECOMENDACIONES DE USO	19
¿QUÉ OTROS CULTIVOS PUEDO INCORPORAR AL SISTEMA?	20
HERRAMIENTAS DE APOYO DISPONIBLES	22
3 - IMPORTANCIA DE LA SEMILLA CERTIFICADA EN LA CONTENCIÓN DEL ARROZ MALEZA	23
INTRODUCCIÓN	23
SISTEMA NACIONAL PARA PRODUCCIÓN DE SEMILLA DE ARROZ	23
PRODUCCIÓN DE SEMILLA DE ARROZ	25
RESULTADOS DE LA CREACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL PROGRAMA DE CERTIFICACIÓN DE SEMILLAS DE ARROZ	26
SEMILLA IMPORTADA	27
LAS FORTALEZAS DEL SISTEMA EN EL USO Y ADOPCIÓN DE SEMILLAS CERTIFICADAS	27
Situación en la región	27
BIBLIOGRAFÍA	28
4 - FLUJO GÉNICO DEL ARROZ CLEARFIELD® AL ARROZ MALEZA: ESTUDIO DE CASOS	30
INTRODUCCIÓN	30
MATERIALES Y MÉTODOS	30
1 Muestreos	31
2 Aplicación de herbicida	31
3 Detección molecular de mutaciones de resistencia	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
CONCLUSIONES	35
BIBLIOGRAFÍA	35

	Página
5 - MONITOREO DE MUTACIONES DE RESISTENCIA A IMIDAZOLINONAS EN	
ARROZ MALEZA	37
INTRODUCCIÓN	37
MATERIALES Y MÉTODOS	38
Muestras analizadas en el SDRI y conjuntos de datos para análisis estadísticos	38
Análisis molecular	38
Análisis estadístico	39
Conjuntos de datos	39
Modelos	39
RESULTADOS	39
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	41
BIBLIOGRAFÍA	42
6 - RESISTENCIA DE CAPINES A HERBICIDAS EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN	
DE ARROZ	44
INTRODUCCIÓN	44
HERBICIDAS INHIBIDORES DE LAALS	46
MALEZAS PROBLEMA EN SISTEMAS ARROCEROS	48
MALEZAS RESISTENTES EN SISTEMAS ARROCEROS DE URUGUAY	50
ESTRATEGIAS PARA REDUCIR EL RIESGO DE EVOLUCIÓN A BIOTIPOS	
RESISTENTES	52
BIBLIOGRAFÍA	52
7 - DISIPACIÓN DE LOS RESIDUOS REMANENTES DE LAS IMIDAZOLINONAS	
Y SU INCIDENCIA EN LOS CULTIVOS SIGUIENTES	56
GENERALIDADES DE LAS IMIDAZOLINONAS	56
DINÁMICA DEL PH EN EL SUELO BAJO INUNDACIÓN	58
¿CÓMO SE COMPORTAN LOS RESIDUOS DE LAS IMIDAZOLINONAS EN EL PERFIL	
DEL SUELO INUNDADO?	59
Disipación de los residuos de las imidazolinonas en el agua de riego	62
Disipación de las imidazolinonas en el suelo	64
Efecto de las imidazolinonas en los cultivos siguientes	67
Susceptibilidad de las especies forrajeras a los residuos remanentes del imazapir	
+ imazapic	67
Efecto de los residuos del imazapir + imazapic sobre la productividad inicial de la pastura .	69
Efecto de los residuos del imazapir + imazapic en la secuencia arroz CL, raigrás,	
arroz no CL y/o sorgo forrajero bajo siembra directa	72
Efecto de los residuos remanentes del imazapir + imazapic en arroz no CL bajo	
siembra convencional	76
Efecto de los residuos remanentes del imazapir + imazapic sobre la soja siguiente ...	77
¿CÓMO MITIGAR LOS EFECTOS NO DESEADOS DE LOS RESIDUOS REMANENTES	
DE LOS HERBICIDAS?	79
BIBLIOGRAFÍA	80
8 - EL USO SOSTENIBLE DEL ARROZ RESISTENTE A IMIDAZOLINONAS	
INCLUYE ROTACIONES	83
INTRODUCCIÓN	83
¿Qué pasó con las poblaciones del arroz maleza?	83
¿Qué pasó con las poblaciones de capín?	84
¿Qué pasó con la acumulación de los residuos de imazapir + imazapic?	84
¿Qué pasó con la deriva de los herbicidas?	85
¿Qué pasó cuando en el apuro no se leen las etiquetas de los herbicidas a utilizar? ..	86
¿Qué estrategias se deben de usar para minimizar los efectos no deseados?	87
CONCLUSIÓN	87
BIBLIOGRAFÍA	87

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Capítulo 1.	
Figura 1. Evolución del área sembrada con arroz y con arroz resistentes a las imidazolinonas, y de la productividad del arroz en el período 1991- 2019.	4
Figura 2. Díptico de difusión de COOPAR SA destinado a promover distintas prácticas culturales para reducir las poblaciones de plantas de arroz maleza de las chacras con infestación.	5
Figura 3. Esquema esquelético básico de los herbicidas usados en el arroz Clearfield®	13
Capítulo 3.	
Figura 1. Esquema explicativo del Sistema Nacional para Producción de Semillas de Arroz en Uruguay, sus categorías de multiplicación y actores involucrados	24
Figura 2. Evolución de la proporción de semilla de arroz certificada, comercial y sin categoría en Uruguay.	27
Capítulo 4.	
Figura 1. Marcación de puntos y protección de la semilla para su colecta	32
Figura 2. Ejemplos de variabilidad fenotípica observada en AM de sectores C y D, indicadora de poblaciones segregantes	32
Figura 3. Distribución espacial de puntos muestreados y resultados de la aplicación de imidazolinonas en plantas de AM colectadas de los cuatro sectores del Caso I.....	33
Figura 4. Resultados del análisis molecular de plantas seleccionadas de progenies con más del 50% de sobrevivientes tras la aplicación de dosis letales de imidazolinonas, en los cuatro sectores del Caso I	34
Capítulo 5.	
Figura 1. Evolución de la probabilidad de resistencia en plantas de AM a lo largo de las últimas 8 zafas en chacras con intensidad de uso de CL baja (menor a 2 años), media (2 años) y alta (más de 2 años)	40
Figura 2. Probabilidades de resistencia en plantas de AM colectadas al primer año de uso de CL	40
Capítulo 6.	
Figura 1. Evolución de resistencia a herbicidas en una población de malezas, bajo presión de selección impartida por el uso de herbicidas	44
Figura 2. Principales factores de riesgo para la evolución de resistencia, y sus componentes	47
Figura 3. Distribución de los biotipos de <i>Echinochloa crus-galli</i> con resistencia a los diferentes herbicidas en uso en arroz. Se incluye la información de la intensidad de uso arrocero del área en cuestión (color más oscuro, mayor intensidad)	51
Capítulo 7.	
Figura 1. Distintas formas químicas de las imidazolinonas en la solución acuosa	56
Figura 2. Efecto del pH de la solución acuosa en la composición de distintas formas químicas ...	57
Figura 3. Efecto del pH en el coeficiente de distribución (Kd) entre la matriz coloidal del suelo y el agua.....	57
Figura 4. Distribución de la concentración de imazetapir (µg/kg) en los distintos horizontes en el perfil del suelo muestreado después de haber cultivado dos años seguidos arroz CL y un año arroz no CL bajo siembra convencional con laboreo y en siembra directa	59

Página

Figura 5. Altura de la planta del sorgo forrajero (cm) a las 4SDS de los tratamientos (●) sin imazapir + imazapic y (○) con 110 + 37 g a.e./ha de imazapir + imazapic correspondiente a los muestreos en el horizonte de 0-10 cm estudiados en función del sitio y del año de recolección..... 60

Figura 6. Altura de la planta del sorgo forrajero (cm) a las 5SDS de los tratamientos (●) sin imazapir + imazapic y (○) con 110 + 37 g a.e./ha de imazapir + imazapic correspondiente a los muestreos de 10-20 cm estudiados en función del sitio y año de recolección. 61

Figura 7. Materia seca producida (kg/ha) por cada especie forrajera a los 180 días después de la siembra sobre el rastrojo del arroz Clearfield con dosis crecientes de imazapir + imazapic en postemergencia aplicadas en el cultivo 68

Figura 8. Rendimiento de arroz (kg/ha) frente a dosis crecientes de la premezcla de imazapir + imazapic aplicadas en postemergencia al arroz CL el año anterior en la Unidad Experimental Paso de La Laguna 77

Figura 9. Respuesta en el rendimiento de la soja (kg/ha) siguiente a los residuos remanentes dejados por el uso de dosis crecientes de imazapir + imazapic aplicadas en postemergencia en el arroz CL en 2014-2015. Santa María, 2015-2016 78

Capítulo 8.

Figura 1. Susceptibilidad del AM a la mezcla preformulada de imazapir + imazapic, y mutaciones de resistencia en dos chacras con historia contrastante. Río Branco, 2017-2018..... 84

Figura 2. Escapes de capín al control de la aplicación de la mezcla preformulada de imazapir + imazapic en dos situaciones distintas 85

Figura 3. Sorgo forrajero afectado por los residuos de la mezcla de imazapir + Imazapic. Este de Cerro Largo, 2016-2017 86

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Capítulo 1.	
Tabla 1. Algunos materiales resistentes a las imidazolinonas que estuvieron o están disponibles en el Mercosur	11
Tabla 2. Coeficientes obtenidos del ajuste del modelo log-logística de cuatro parámetros para las variedades e híbridos portadores de la mutación Ser ₆₅₃ Asp para cada herbicida considerado	12
Tabla 3. Coeficientes obtenidos del ajuste del modelo log-logística de cuatro parámetros para las variedades e híbridos portadores de la mutación Ala ₁₂₂ Thr para cada herbicida considerado	12
Tabla 4. Algunas propiedades químicas de los herbicidas usados en el arroz Clearfield® 14	
Tabla 5. Vida media de las imidazolinonas y otros herbicidas usados en arroz Clearfield® en las matrices agua y suelo	15
Capítulo 4.	
Tabla 1. Detalle de características de cada sector estudiado en el Caso I	31
Capítulo 6.	
Tabla 1. Moléculas de inhibidores de la ALS clasificadas según su química (grupo) y patrones de resistencia cruzada más comunes	48
Capítulo 7.	
Tabla 1. Evolución de la concentración (µg/l, ppb) del imazapir e imazapic en el agua de inundación del arroz Clearfield®. Río Branco, 2008-2009 y 2009-2010	63
Tabla 2. Evolución de la concentración (µg/L, ppb) de los principios activos imazapir e imazapic en el agua de inundación del arroz Clearfield®. UEPL, 2007-2008, 2008-2009 y 2009-2010	64
Tabla 3. Cinética de la foto degradación del imazapir, imazetapir e imazaquin tanto en agua como en la superficie del suelo (n=3)	67
Tabla 4. Características del suelo utilizado en Río Branco y en la UEPL para la evaluación de la susceptibilidad de las distintas especies a los residuos de imazapir + imazapic en el suelo	67
Tabla 5. Materia seca producida a los 180 días después de la siembra (DDS) sobre el rastrojo de arroz Clearfield por especies forrajeras seleccionadas en un suelo de Río Branco, 2008-2009	68
Tabla 6. Características fisicoquímicas y textura del solod melánico en los distintos sitios de la Unidad Experimental Paso de La Laguna (UEPL)	69
Tabla 7. Materia seca producida por la pradera a los 180 días después de la siembra debido a la interacción año por tratamiento herbicida en la U E Paso de La Laguna ...	70
Tabla 8. Materia seca producida por las malezas a los 180 días después de la siembra debido a la interacción año por tratamiento herbicida en la U E del Paso de La Laguna ..	70
Tabla 9. Materia seca producida por la pradera a los 180 días después de la siembra debido a la interacción año por manejo del riego en la U E del Paso de La Laguna	71
Tabla 10. Materia seca producida por las especies a los 180 días después de la siembra (DDS) promedio de siembra a 1 y 5 SDC de la pradera con dosis de imazapir + imazapic. Río Branco, 2008-2009	71
Tabla 11. Características de los suelos usados para los estudios de secuencia de cultivos	72

Tabla 12. Resultados promedios obtenidos para densidad y crecimiento inicial de las plantas a los 90 días después de la siembra (DDS) y altura de la planta al corte del raigrás cv. LE 284 respecto a las dosis de imazapir + imazapic en ambos sitios evaluados	72
Tabla 13. Productividad del raigrás cv. LE 284 a los 180 después de la siembra debido a la interacción entre las dosis de imazapir + imazapic y el año de siembra arroz CL/sitio	73
Tabla 14. Resultados obtenidos con El Paso 144 en la Unidad Experimental Paso de La Laguna (UEPL) y con INIA Olimar en Río Branco.	73
Tabla 15. Efecto de la mezcla de imazetapir + imazapic asperjada en IRGA 422 CL en el año 2004-2005 en el cultivo siguiente de IRGA 417 sembrado a los 371 días después de la aplicación. Santa María, 2005-2006	73
Tabla 16. Efecto de la mezcla de imazetapir + imazapic asperjada en IRGA 422 CL en el año 2004-2005 en el cultivo siguiente de IRGA 417 sembrado a los 705 días después de la aplicación. Santa María, 2006-2007	74
Tabla 17. Efecto del imazetapir + imazapic aplicado en postemergencia de IRGA 422 CL en 2006-2007 sobre el arroz no CL siguiente sembrado a los 335 DDA en 2007-2008 y a los 710 DDA en 2008-2009. Capao de Leao, RS	75
Tabla 18. Efecto del imazetapir + imazapic aplicado en postemergencia de BRS Señuelo CL en 2007-2008 sobre el arroz no CL siguiente sembrado a los 339 DDA en 2008-2009 y a los 702 DDA en 2009-2010. Capao de Leao, RS	75
Tabla 19. Resultados obtenidos frente a los residuos remanentes de imazapir + imazapic generados en el suelo con el sorgo forrajero (cv. Talisman en 2009 y cv. ACA 764 en 2010) en Río Branco*	76
Tabla 20. Efecto de la aplicación de imazetapir + imazapic en IRGA 422 CL (2006-2007) en el sorgo forrajero sembrado en dos momentos. Santa María, 2007-2008 y 2008-2009	76
Tabla 21. Características de la soja en estado vegetativo y reproductivo afectadas por la presencia de cobertura en el barbecho para el nivel de humedad del suelo mayor a 70% de la capacidad de campo. Santa María, 2016-2017	78
Tabla 22. Efecto de la cobertura y la humedad del suelo en el barbecho el rendimiento de soja. Santa María, 2016-2017	79

INTRODUCCIÓN

En la siguiente publicación se consolida el conocimiento generado en el marco de la ejecución de varios proyectos relacionados con la utilización de los arroces resistentes a las imidazolinonas, más la experiencia de campo obtenida por los usuarios y las medidas de cuidado de la tecnología recomendada por la empresa BASF. Entre los proyectos, se destacan el FTG 0608 «Impacto ambiental de la adopción de los arroces resistentes a las imidazolinonas en sistemas productivos contrastantes de América Latina» financiado parcialmente por el Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO) a partir de 2007, el SCT_X_2010_1_14 sobre el «Servicio de detección molecular de arroz maleza resistente a herbicida» financiado por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) en el marco del llamado Fortalecimiento de Servicios Científico-Tecnológicos 2010 y finalmente, el proyecto Az_25_0_00 «Manejo de las poblaciones de capín resistentes a los herbicidas usados en arroz», financiado por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), también iniciado en el mismo año.

Se recibió apoyo de BASF en el financiamiento de actividades específicas de los proyectos, suministro de los estándares analíticos del imazapir e imazapic

y del herbicida usado asociado a la tecnología.

El objetivo de esta publicación es exponer lo aprendido respecto a esta tecnología y ahondar en la elaboración de pautas claras para promover un manejo sustentable de la misma. La publicación está estructurada en ocho capítulos independientes, tratando diferentes aspectos relevantes para cumplir con ese objetivo. Se incluye una introducción, una revisión bibliográfica sobre el origen del arroz maleza en el mundo, cómo se generó la resistencia a las imidazolinonas en el arroz cultivado y las características más relevantes de los herbicidas asociados (Capítulo 1), las recomendaciones de uso de la tecnología (Capítulo 2), la descripción del vital proceso de producción de semilla certificada (Capítulo 3), la adquisición de las mutaciones por el arroz maleza que portan las variedades de arroz resistentes (Capítulo 4), el servicio de detección de mutaciones en el arroz maleza (Capítulo 5), las implicancias de la resistencia inducida por el uso de los herbicidas asociados a la tecnología (Capítulo 6), la disipación de los residuos de los herbicidas en el agua y suelo y cómo afectan a los cultivos siguientes (Capítulo 7) y finalmente, el manejo agronómico de la tecnología inmersa en el sistema de producción (Capítulo 8).

1 - LA PROBLEMÁTICA DEL ARROZ MALEZA Y SU CONTROL CON EL ARROZ RESISTENTE A LAS IMIDAZOLINONAS

PALABRAS CLAVE: de-domesticación, imazapir e imazapic, mutaciones inducidas arroz

ANTECEDENTES

Evolución del arroz maleza en el país

El cultivo de arroz en Uruguay comenzó a tener un área de siembra establecida en el este, a partir de 1930. La producción fue creciendo hasta satisfacer el consumo nacional, iniciándose posteriormente una corriente exportadora firme del cereal. En aquel entonces predominaba el uso de semilla importada con presencia de malezas contaminantes, lo que motivó la introducción de las dos malezas principales asociadas al cultivo: el arroz maleza (*Oryza sp.*) y el capín (*Echinochloa crus-galli*) (Topolansky, 1975).

El arroz maleza es una planta anual, exótica, autofecunda, diploide, emparentada con el arroz cultivado, conocida popularmente como arroz rojo debido a que su pericarpio es color rojo a amarronado y muy asociada al sistema de siembra del arroz en suelo seco con posterior inundación. Tiene gran capacidad de macollaje y tiende a ser más alta que las variedades de arroz actualmente cultivadas, lo que le otorga la capacidad de interferir con el cultivo y originar pérdidas productivas muy significativas. Además, presenta fácil y elevado desgrane de las semillas, pericarpio rojo y semillas con dormancia, lo que la hace una maleza muy persistente en las chacras de arroz (Delouche *et al.*, 2007).

En la etapa vegetativa las hojas son largas y angostas de color verde claro y hábito decumbente. En nuestro país han sido identificados dos biotipos característicos:

- a) el arroz maleza común, cuyas semillas están cubiertas con cáscara de color paja (lema y pálea), generalmente aristas ausentes en aquellas espiguillas ubicadas en las raquillas medias y superiores, y aristas cortas o ausentes en gran parte de las semillas ubicadas en las raquillas inferiores de la panoja; no presenta coloración púrpura en la base de las vainas;
- b) arroz maleza denominado arroz negro, con semillas con las envolturas de color negro donde todas tienen aristas muy largas. Presenta la base de las vainas con coloraciones púrpura y a veces se expresan en el borde de las láminas, así como en el apículo de las espiguillas.

En ambos biotipos cuando se remueven las cubiertas de las semillas, queda al descubierto un pericarpio frecuentemente de color rojo y/o amarronado (Zorrilla, 1992).

Se estima que cuando esta maleza interfiere durante todo el ciclo del arroz, puede reducir la productividad en un 80% (Smith, 1988). La interferencia de 35 plantas/m² en una variedad de arroz precoz y de baja estatura redujo en un 90% su rendimiento, mientras que 40 plantas/m² en una variedad de ciclo largo y alta produjo un 67% menos. Los componentes que se ven más afectados son la densidad de panojas y el número de granos/panoja (Kwon *et al.*, 1992).

A nivel de chacra, como la distribución espacial de la maleza problema no es uniforme sino más bien agregada, la mayor

pérdida de productividad se presenta en esos sectores. Cuando se cosecha el arroz en esas áreas, se colecta un 30% de las semillas del arroz maleza, dispersándose el restante en el suelo (Diarra *et al.*, 1985). Las semillas colectadas contaminan las cargas del arroz cáscara enviadas al recibo, determinándose deducciones del 0,25% por 1% o fracción por encima de la base de comercialización (1%). En casos extremos los envíos pueden ser rechazadas cuando el contenido de granos rojos excede la tolerancia de recibo de 5% de acuerdo con el decreto 321/988 (MGAP, 1988). Para la industria manejar los granos rojos resulta en mayores costos debido a que implica mayor tiempo de pulido para eliminar los restos del pericarpio rojo del grano dado que el consumidor prefiere la ausencia de estos granos rojos. Además, implicó mayores inversiones en incorporar clasificadoras por color para eliminar granos con defectos. Entre ellos los granos rojos en el arroz precocido dado el contraste que generan o los granos de la maleza, además, al ser más cortos y anchos, y presentar un porcentaje alto de yeso se hacen muy visibles en el arroz elaborado que debe tener una gran uniformidad en la apariencia de los granos.

El arroz maleza común era el tipo más frecuentemente observado en el cultivo durante muchos años, coincidiendo con la predominancia en el área de cultivo de la variedad Bluebelle, perteneciente al subgrupo *japónica* tropical y de ciclo corto. A mediados de la década de los ochenta se liberó el cultivar El Paso 144, perteneciente al subgrupo *índica* y ciclo más largo, que sustituyó rápidamente a Bluebelle. A partir de ese cambio abrupto, los técnicos comenzaron a observar más frecuentemente la presencia del arroz negro, atribuyéndolo a que el ciclo más largo del cultivo le permitía al arroz negro finalizar el llenado de sus semillas, desgranándose las mismas apenas alcanzaban la madurez fisiológica previo a la cosecha del arroz (Com. pers. Varela, J., Etcheverry, A., Platero, A., 1997).

Control del arroz maleza previo a la nueva tecnología

El área sembrada con arroz alcanzó 220 mil ha en 1998, variando entre 180 y 166 mil ha durante varios años, reduciéndose en las últimas zafras hasta alcanzar 143 mil ha (Figura 1). En la fase expansiva del área, se promovió por parte de la Asociación de Cultivadores de Arroz (ACA), la Gremial de Molinos más COOPAR, Instituto Nacional de Semillas (INASE, ex DIGRA-MGAP) y el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA, ex CIAAB) el uso de semilla certificada libre de malezas. Esta se constituyó en una medida altamente eficaz para evitar que se propagara el arroz maleza a las áreas de campos vírgenes que se iban colonizando (Zorrilla, 1992). En la actualidad, tener la mayor parte del área libre de esta maleza es una ventaja competitiva del sector. En la zafra 2008-2009, se cuantificó que alrededor del 31% del área sembrada correspondió a chacras en las cuales los productores realizaron algún manejo diferencial debido a la presencia del arroz maleza (DIEA/MGAP, 2009).

En situaciones de chacras con infestaciones de baja densidad de arroz maleza, se retiraban las plantas por medio de cuadrillas de personal entrenado y contratadas para esa tarea específica. Se destaca el caso particular de COOPAR que llegó a promover esta práctica financiándola a la cosecha hasta fines de la primera década de este siglo procesando en la actualidad muy pocos casos (Figura 2). Se embolsaban las plantas colectadas y se las quemaba o enterraban para su disposición final. En algunos otoños lluviosos, las plantas removidas de la chacra se depositaban afuera del arrozal y al no llegar a destruirlas a tiempo, las mismas arraigaban y dieron semillas, estableciéndose la infestación en el borde la chacra (traslado físico). En otros casos similares se usaba un equipo de barras llevado por dos operarios, con cuerdas que se humedecían desde un depósito y liberaban una solución con glifosato al 50%. Cuando tocaba la hoja bandera y la

panoja del arroz maleza que sobresalía sobre el cultivo, se absorbía suficiente para evitar que formasen semillas viables.

En otras chacras se presentaban infestaciones en manchones bien diferenciados, donde no era posible obtener arroz, se le aplicaba glifosato directamente para evitar la producción de semillas viables. En situaciones de chacras muy grandes con infestaciones variables en densidad y distribución espacial no eran prácticos ni eficientes los métodos antes mencionados. Aunque no fue una práctica adoptada en general, en chacras con el escenario descrito anteriormente, se asperjaba hidracida maleica por medio de un avión agrícola cuando la panoja de arroz maleza finalizaba la floración y el arroz comercial estaba en estado pastoso. Consecuentemente, la semilla de arroz maleza no germinaba (Com. pers. Varela, J., 2003) debido a la mal formación del embrión (Gigena y Moreira, 2002), disminuyendo las entradas de semillas viables al banco de semillas del suelo.

Evolución del área sembrada con arroz resistente a las imidazolinonas

La creación de los arroces resistentes a las imidazolinonas permitió el control selectivo del arroz maleza, dado que, anteriormente era imposible realizar un

control químico selectivo debido a su similitud fisiológica (Crougham *et al.*, 1996). Los herbicidas asociados a esta tecnología obtienen un control eficaz de malezas gramíneas anuales, como el arroz maleza, capín, pasto blanco, malezas de hojas anchas como yerba del bicho, gamba rusa, gramíneas perennes como gramilla y del género *Paspalum*, y ciperáceas, con el manejo de la inundación adecuado (Anónimo, BASF, 2017).

A partir de la zafra 2005-2006, se inició la siembra de los primeros materiales de arroz resistentes en el país. Entre ellos, se destacan la variedad CL161 siendo introducida de Luisiana, y Avaxí CL un híbrido de Rice-Tec sustituido posteriormente por INOV CL a partir del 2010. De los materiales generados por el INTA, primero se introdujo la variedad INTA Puitá CL siendo sustituida por Gurí INTA CL en 2011. La variedad IRGA 422CL fue liberada en Río Grande del Sur en el 2003, descartándose el uso de esa mutación en los materiales de INIA por no expresar un nivel de tolerancia adecuada al ambiente local (Com. pers. Deambrosi, E., 2002).

En los últimos años, el área sembrada con estos materiales resistentes aumentó en términos absolutos y relativos hasta la zafra 2017-2018, no obstante la reducción en el área sembrada (Figura 1). Básicamente, esto ocurre porque se sigue

4

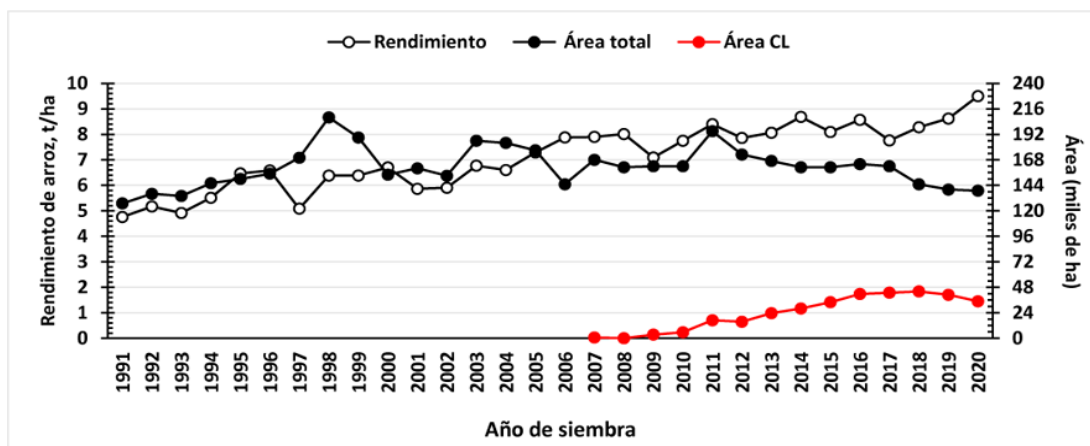


Figura 1. Evolución de las áreas sembradas con arroz y con arroz resistente a las imidazolinonas, y de la productividad del arroz en el período 1991-2019. Elaborado con datos del Boletín de Estadísticas Agropecuaria y Encuesta arrocera (DIEA-MGAP) e Informe final de zafra de la Comisión Sectorial del Arroz (CSA-OPP).

cultivando los campos que tenían arroz maleza en el pasado y que motivaron el uso de los arroces resistentes a las imidazolinonas. En esos sitios los sistemas de riego dominan un área con suelos de fácil preparación, con menor contenido de materia orgánica y de la fracción arcilla y mayor contenido de la fracción arena en el horizonte superficial. La infraestructura para riego y la caminería interna ha sido largamente amortizada, con suministro de agua abundante y confiable de los ríos como el Yaguarón, Tacuarí y Cebollatí, además de la laguna Merín en el este y en el río Tacuarembó junto a áreas regadas por represas en la zona centro. Sobre suelos más fértiles existen sistemas de riego que toman agua de los ríos Uruguay y Cuareim en el norte del país, donde la infestación de arroz maleza perdura. En menor medida y contrariamente a lo recomendado, los materiales resistentes se han usado en áreas sin problemas de arroz maleza, con suelos de mayor pendiente, fertilidad, y regados por gravedad desde represas, básicamente por practicidad para controlar otras malezas como *Digitaria* spp., aunque existe un menú con disponibilidad de opciones para el control eficaz de dichas malezas.

En su cartilla de divulgación para el seguimiento y cuidado de la tecnología,

BASF recomienda sembrar hasta dos años consecutivos con arroz Clearfield®. El sistema Clearfield® es una de las tecnologías de arroz resistente a las imidazolinonas, con el uso una mezcla preformulada de imazapir e imazapic. Además, se agregan a los híbridos resistentes disponibles de RiceTec una nueva generación conocida como FullPage. Como todos los sistemas que involucren el uso de arroz resistente a herbicidas, su uso debe acompañarse por un seguimiento minucioso de las chacras para mantener la eficacia de control de la tecnología en las mismas (Anónimo a, BASF).

ARROZ MALEZA

Origen del arroz maleza (arroz rojo o arroz macho)

El proceso de domesticación del arroz cultivado (*Oryza sativa* L.) comenzó hace unos 8000 años atrás, probablemente en distintos lugares al mismo tiempo, sobre diferentes poblaciones de arroz salvaje (*O. rufipogon*). Esta es una especie perenne con semillas de cubiertas de color negro u oscuros, aristas largas, pericarpio rojo con dormancia secundaria y dehiscentes. El rango de distribución de esta especie era más al norte de la actual de-



Figura 2. Díptico de difusión de COOPAR SA destinado a promover distintas prácticas culturales para reducir las poblaciones de plantas de arroz maleza de las chacras con infestación. Izq.: parte externa, Der.: parte interna (Quartino y Rovira, 2005).

limitación, donde comenzó la domesticación del arroz cultivado, según lo indican los hallazgos arqueológicos recientes. La obtención de plantas anuales permitió el cultivo de manera repetida y el ejercicio de una presión de selección uniforme y sostenida para obtener panojas con más semillas, con envolturas de color paja, granos que se mantengan unidos al raquis y no se broten en la panoja, con floración más uniforme, sin dormancia o de corta duración entre la cosecha y la próxima siembra, y ausencia de pericarpio rojo. A ese conjunto de características se lo conoce como síndrome de domesticación. El esfuerzo invertido valía la pena porque se obtenía más alimento que recolectando semillas de las poblaciones del arroz salvaje. En la actualidad, cultivares parcialmente domesticados se usan en el oeste de India, siendo más precoces y uniformes a la floración, presentando un hábito erecto y aristas más cortas que el arroz salvaje (Vaughan *et al.*, 2005).

Dos tipos genética y morfológicamente diferentes de arroces divergieron en distintos momentos y zonas geográficas, probablemente seleccionados desde poblaciones de arroces salvajes diferentes. El primero que fue seleccionado es el tipo *japónica* que se cultiva en la zona templada y en las tierras altas por encima de 1600 m sobre el nivel del mar de la zona tropical y posteriormente surgió el tipo de los arroces *índica* del cual derivan las variedades que se cultivan en la zona tropical de Asia y sur de China. Ambos tipos de arroces están compuestos por más de un subtipo que son genéticamente diferentes; mientras que en el tipo *japónica* se incluyen los subtipos: *japónica templada*, *japónica tropical* y *aromáticos*, en el tipo *índica* están los subtipos *aus* e *índica* (Li y Olsen, 2020).

Con los avances recientes sobre el origen del arroz rojo, se acuñó el nombre de arroz maleza dejando de lado el término arroz rojo reflejando el estado del arte del conocimiento sobre la maleza. Durante muchos años se pensó que era una especie anual congénere de *Oryza* y que estaba asociada al ancestro del arroz cultivado

como *O. rufipogon* o la forma anual *O. nivara*; finalmente, se estableció que es conoespecífica del arroz cultivado y es una forma con características de maleza derivada de aquel, denominándose *Oryza sativa* f. *spontanea* Rosh. En la enorme mayoría de los casos tiene el pericarpio rojo, siendo la coloración variable en intensidad y uniformidad (Li y Olsen, 2020).

El proceso que origina una maleza a partir de una especie cultivada o durante su trayectoria de domesticación por el hombre a partir de una especie salvaje, se denomina de-domesticación. La selección natural opera con intensidad variable seleccionando caracteres que le permitan al biotipo adaptarse y dejar la mayor descendencia viable para sobrevivir en el agroecosistema del cultivo de arroz y su entorno más inmediato, no sobreviviendo afuera del ambiente del cultivo. Los caracteres asociados a las plantas salvajes, sin domesticación, como la dehiscencia elevada de las semillas de la panoja, la expresión de la dormancia secundaria en la semilla, las coloraciones negras u oscuras de las envolturas de la semilla con presencia de arista largas y la presencia de pigmentos derivados de la antocianina con coloraciones púrpuras en diferentes partes de la planta como la base de la vaina, nudos, bordes de la hoja, lámina de la hoja, ápulo y pericarpio son conocidos como síndrome de adaptación (Qiu *et al.*, 2017).

La de-domesticación no es simplemente el proceso inverso a la domesticación, sino que es la selección natural operando sobre distintos genes o grupos de genes en el genoma del arroz cultivado en los cuales operó o no la selección realizada por los incipientes agricultores durante el proceso de domesticación. Cuando comenzaron a divergir los primeros individuos de arroz maleza que se separan del arroz ancestral cultivado o desde variedades locales mejoradas más tardíamente, pasan por un cuello de botella en el tamaño efectivo de la población. Esto significa que efectivamente los individuos que se podrían cruzar entre sí son muy pocos, siendo ese grupo inicial de individuos el que fundara la nueva población de la maleza. La duración del cuello de

botella se estimó en unos 150 años, siendo considerado corto comparado con el sufrido por el arroz cultivado cuando fue separado del arroz salvaje que se prolongó por unos 3000 años (Qiu *et al.*, 2017).

En un estudio de los arroces maleza de cáscara negra y cáscara color paja de EE.UU. y color paja de China, se estableció que la divergencia relativa de aquellos con cáscara negra de los arroces del subtipo *aus* ocurrió más tempranamente que el arroz maleza común, con cáscara color paja, de los arroces del subtipo *índica*. El biotipo con cáscara color paja de EE.UU. divergió más temprano que aquel de China. El arroz maleza con cáscara negra presentaba mayor proporción de los alelos presentes en el ancestro salvaje o en arroces ancestrales más antiguos pertenecientes al subtipo *aus* que de las variedades de arroz mejoradas más recientemente. En cambio, los arroces malezas comunes mostraban mayor proporción de genes con alelos que provienen de las variedades de arroz mejoradas del subtipo *índica*. En orden cronológico, la divergencia de los distintos arroces maleza durante la trayectoria de la domesticación de los arroces cultivados ocurrió posteriormente a la divergencia *aus-índica* (Li *et al.*, 2017).

Características que facilitan su persistencia en el agroecosistema del arroz

Desgrane de las semillas

La dehiscencia de las semillas es una característica evolucionaria que es vital para la sobrevivencia del arroz salvaje en el entorno natural y de los arroces maleza en el agroecosistema del cultivo. El gen *Sh4* que codifica la dehiscencia de las semillas en el arroz salvaje presenta el alelo salvaje con un nucleótido T en una posición determinada que expresa alta dehiscencia; mientras que cuando es sustituido el nucleótido T por G en las variedades del tipo *índica*, el fenotipo no muestra dehiscencia de las semillas. Sucede lo mismo en el gen *qSH1* que codifica ese carácter en las variedades de arroz del tipo *japónica* templada.

En este caso la sustitución de un nucleótido G en el arroz salvaje por otro T en el gen reduce marcadamente la dehiscencia de semillas en este tipo de arroz. Existe consenso sobre que la selección en contra de la dehiscencia de semillas se realizó tempranamente en el proceso de domesticación dado que al incipiente agricultor le interesaba que no se cayeran al suelo las semillas para facilitar la colecta. Sin embargo, aunque los arroces maleza con cáscara negra de EE.UU. y los biotipos con cáscara color paja de EE.UU. y China portan el alelo seleccionado durante la domesticación en el gen *Sh4* y *qSH1*, respectivamente, no perdieron la alta capacidad de dehiscencia de la semilla. Según los autores, estos hechos indican que el arroz maleza se originó del arroz ancestral cultivado dada la presencia de estos alelos, no obstante, la selección natural actuó sobre un gen u otro grupo de genes en otra parte de genoma durante el proceso de de-domesticación, recuperando la capacidad de dehiscencia de las semillas (Li *et al.*, 2017).

En ese sentido, otros autores estudiaron la gran variabilidad existente en la dehiscencia de semillas en los arroces malezas de Río Grande del Sur, Brasil y demostraron que la expresión del gen *OsCLP1* estaba asociado a alta dehiscencia de las semillas en la maleza, aunque no en el arroz cultivado. Este gen tiene que ver con el mantenimiento de la integridad de la capa de abscisión entre el raquis y la inserción de la semilla. Además, en esta maleza se identificaron los genes *OsXTH8* y *OsCel9D* que regulan la expresión de la síntesis y la degradación de la pared celular asociados a grados altos de dehiscencia de las semillas (Nunes *et al.*, 2014).

Color del pericarpio/dormancia de las semillas

Este es un carácter muy importante porque su presencia está asociada a la expresión de dormancia secundaria en las semillas, existiendo un control pleiotrópico, es decir que cuando está presente el pericarpio rojo también presentarán las semillas dormancia secundaria (Gu *et al.*, 2011). En Uruguay se determinó que la

semilla del arroz maleza sobrevivió enterrada en el suelo hasta doce años (Pereira *et al.*, 2013). El alelo funcional del gen *Rc* que otorga el color rojo al pericarpio se presenta en el arroz salvaje, variedades ancestrales y en los arroces maleza. En investigaciones recientes, se demostró que su presencia junto a otros genes que regulan la dormancia en la semilla tiene efecto sobre la longevidad en el suelo. La acumulación de genes que regulan la dormancia en la semilla incide en la persistencia de las poblaciones del arroz maleza en el agroecosistema (Pipatpongpinoy *et al.*, 2020). La selección natural favorece el mantenimiento del pericarpio rojo seleccionando a favor de mantener el alelo funcional del gen *Rc*, lo que no quiere decir que no existan arroces maleza con pericarpio sin pigmentación, pero no van a perdurar en la población de la maleza porque no les ofrece una ventaja para la sobrevivencia de los individuos (ausencia síndrome de adaptación) (Li *et al.*, 2017). Existen dos sitios en el genoma, uno ocupado por el gen *Rc* en el cromosoma 7 y otro que corresponde al gen *Rd* en el cromosoma 1 siendo la combinación de sus alelos lo que determinará la coloración del pericarpio. Cuando están presentes el alelo funcional del gen *Rc*, que es dominante sobre el alelo *rc*, domesticado y no funcional por presentar una supresión de 14-bp, y el alelo *Rd* el pericarpio es rojo como en *O. rufipogon*, arroces ancestrales y el arroz maleza; mientras que cuando está presente el alelo *rc* en los arroces del tipo *japónica*, pasado por hibridación selectiva a los arroces del tipo *índica* durante la domesticación, concomitantemente con el alelo *Rd* el pericarpio es incoloro. El alelo *Rc* en presencia del alelo *rd* presenta pericarpio de color marrón, en cambio el alelo *Rc-s*, domesticado, derivado de los arroces del subtipo *aus*, y el alelo *Rd* presentará un pericarpio con coloración levemente rojiza (Gross *et al.*, 2010; Tong *et al.* 2021). El alelo funcional del gen *Rc* codifica una proteína bHLH que regula la síntesis de protoantocianidina determinando la pigmentación en el pericarpio (Sweeney *et al.*, 2006).

Color de la cáscara de la semilla

Todas las especies salvajes de *Oryza* y los arroces maleza que tienen cubiertas de color negro en las semillas llevan el alelo funcional del gen *Bh4* ubicado en el cromosoma 4. Ese alelo es dominante para esta característica, regulando su expresión a la madurez de la semilla, sin embargo, la ruta bioquímica aún no ha sido dilucidada. Algunos autores señalan que cuando se desgranar las semillas y caen al barro, el color oscuro puede otorgarle una ventaja adaptativa a la descendencia para que sobrevivan debido a que son menos detectadas por las aves que las consumen o por la presencia de mayor concentración de sustancias antioxidantes que desalientan el consumo. En los arroces cultivados del tipo *índica* el gen *Bh4* presenta dos alelos, con pérdida de la función, que determinan el color paja de la cáscara de la semilla. Uno tiene una supresión de 22-bp y el otro una supresión de 1-bp en distintos sitios del gen *Bh4* que están presentes en el 92% y 8% de los casos estudiados; respectivamente. En 1% de los casos el gen *Bh4* portaba el alelo funcional asociado con la cáscara de color paja, lo que indicaría que la pérdida de función no es el único mecanismo que produce ese fenotipo y que podría haber otros genes u otros mecanismos involucrados. Un caso particular existe en los arroces del subtipo *aus*, la variedad Kasalath tiene cáscara color paja debido a la sustitución de un solo nucleótido por una mutación puntual en la secuencia del gen *Bh4* resultando el alelo no funcional. Otros genes estarían involucrados en la regulación del color de las envolturas de la semilla. Por ejemplo, en los arroces del tipo *japónica* se insertó el alelo funcional del gen *Bh4* y no se logró revertir el color de la cáscara mientras que eso fue posible en los arroces del tipo *índica* (Vigueira *et al.*, 2013).

El arroz maleza en otros países

En China se estudiaron arroces maleza colectados, asociados al tipo *japónica* en el cultivo de arroz de distintas provincias como Liaoning y Ningxia (norte), Jiangsu (centro) y otros asociados al tipo *índica*

Guangdong (sur). La diversidad genética, medida como la diversidad de nucleótidos (π) en el genoma, fue menor en los arroces maleza estudiados que en los arroces cultivados en las provincias de Liaoning, Ningxia y Jiangsu; mientras que aquellos colectados en la provincia de Guangdong mostraron mayor diversidad que los arroces cultivados. En esta última provincia, ubicada en el sur de China, aún coexisten poblaciones de arroz salvaje, *O. rufipogon*, en la proximidad de las áreas cultivadas. Los autores de este trabajo estimaron que la divergencia de los arroces maleza de las variedades cultivadas localmente ocurrió en períodos de tiempo distintos y en múltiples eventos en cada provincia. La estimación de la fecha de divergencia se situó entre 1400 a 300 años atrás, existiendo una gran coincidencia con los registros históricos de los libros de agronomía chinos y la aparición de «Ludao» (arroz maleza) en los arrozales entre 1279 a 960 años atrás durante la dinastía Song (Qui *et al.*, 2017). En otro estudio reciente se determinó que el 38% de los arroces maleza actuales de las provincias de Jiangsu, Zhejiang y Guangdong del sur de China están emparentadas con Nianjing 11, una variedad muy popular que fue cultivada extensivamente cuando la producción de arroz se transformó de pequeñas empresas familiares a una producción más industrial en el siglo XX. Lo mismo sucedió en la provincia Liaoning del norte, donde 38 accesiones de arroz maleza estaban relacionados con la variedad tradicional Huk Zo de Corea (Qui *et al.*, 2020).

Si bien no se ha cultivado arroz durante milenios, el caso de Italia es muy interesante porque el cultivo de arroz se ha realizado por 500 años y no existen parientes salvajes del género *Oryza*. Previo al 1800, se introducían semillas de variedades de grano largo y fino de la India que tenían alta diversidad genética. Probablemente se introdujo semilla contaminada con arroces maleza o eventualmente arroz salvaje o cruzado con la variedad, atento a que se ha detectado el alelo salvaje del gen *Sh4* en baja proporción en los arroces maleza

actuales. Los autores conceptualizan que existió una primera ola de dispersión de los arroces maleza asociada a las introducciones y una segunda ola se originó a partir del 1800 cuando se inició el programa de mejoramiento de arroz (Grimm *et al.*, 2020). La similitud genética encontrada entre las variedades Bertone (1829), Ostiglia (1850) y Ranghino (1887) con algunas poblaciones actuales de los arroces maleza, indica que estas derivaron de las variedades liberadas a mediados del siglo XIX, debido a que no son más cultivadas desde hace mucho tiempo. La divergencia de individuos con características de maleza por de-domesticación es un proceso continuo y lo avala el hecho de que se detectó también otro grupo de arroces maleza muy asociado con la variedad Flipper (1997), contemporánea y del tipo *japónica* (Grimm *et al.*, 2013; Qui *et al.*, 2020). Antes de 1960 el arroz se trasplantaba y se desmalezaba manualmente, siendo la infestación del arroz maleza muy baja. Con la introducción de la siembra directa de arroz en el agua la infestación del arroz maleza se hizo más severa con los años. Actualmente, en la región arrocería del noroeste de Italia, se clasificaron cuatro grupos en función de la presencia de arista, la morfología y coloración de esta. Estos grupos son: sin aristas, con una arista menor a 2 mm (mucronato), con aristas largas mayor 2 mm que podían ser de color paja o negro. En los tres primeros grupos la coloración de la cáscara de la semilla era color paja, mientras que en el grupo con arista larga negra el 24,5 % y el 2,4% mostraron las envolturas de color marrón y negro respectivamente (Grimm *et al.*, 2013).

En EE.UU. similarmente a Italia, no existen poblaciones nativas de arroz salvaje ni otros parientes con genoma AA compatibles para producir cruzamientos viables. Hace unos 170 años, se comenzó a cultivar arroz en el sureste y se documentó la presencia del arroz maleza como contaminante importado en la semilla de arroz en 1846. Actualmente se conocen dos grandes grupos de arroz maleza: el común con cáscara color paja sin aristas y aquel que tiene cáscara negra y aristas largas (Gealy *et al.*, 2009; Gealy *et al.*,

2002). Un tercer grupo que es incipiente y está ganando visibilidad, es el que posee cáscara marrón y aristas. Los dos últimos grupos mencionados, con cáscara negra y el marrón, presentan mayor diversidad genética que el arroz maleza común. Los autores señalan que esto es debido a que el tipo con cáscara negra está más relacionado al arroz cultivado del subtipo *aus* en Bangladesh y del este de la India, mientras que el común está más relacionado a arroces del subtipo *indica* producidos en el este y sudeste asiático. Cuando se estudió la similitud genética con los arroces cultivados, los arroces maleza con cáscara negra y marrón se agruparon separados de los arroces cultivados y del grupo del arroz común. Sin embargo, en los distintos grupos aparecen mezclados individuos de los otros grupos indicando que se comparten alelos vía hibridación entre sí y eventualmente con los arroces cultivados, aunque sean autógamos (Shivrain *et al.*, 2010).

Si bien en la América tropical existen especies silvestres del género *Oryza*, algunas de ellas con genoma AA compatible y arroz salvaje introducido como contaminante desde Asia (Lentini y Espinoza, 2005), en la América templada que incluye al estado de Río Grande del Sur, Brasil, las provincias de Santa Fe, Entre Ríos y Corrientes en Argentina, Chile, Uruguay y el suroeste de EE.UU., no se ha informado de la existencia ni de arroz salvaje ni parientes silvestres del género *Oryza*. En un reciente estudio en América Latina se colectaron 51 accesiones, 9 eran del subtipo *indica*, 4 *aus* y 38 de una supuesta mezcla de subtipos *indica-aus*. El origen de los arroces maleza mezcla fue el resultado de cruzamientos recientes entre subtipos *indica* y *aus* de la maleza. Estos presentaban diversidad genética más alta que los arroces maleza típicos *indica* y *aus* locales, y mayor grado de heterocigosis que los arroces maleza estudiados de otras partes del mundo. Después de que quedó disponible el arroz resistente a las imidazolinonas, se liberaron materiales en los países de América Latina. La mayor parte de las accesiones evaluadas provenían de Brasil y se detec-

taron algunas de las tres mutaciones de la ALS usadas comercialmente en aquellos arroces resistentes. Los autores señalan que la hibridación ha jugado un papel relevante en la actual composición de las poblaciones en el campo, tanto entre los distintos tipos de arroz maleza así como con las variedades de arroz, básicamente del subtipo *indica* (Qiu *et al.*, 2020).

En Uruguay, hace menos de 100 años que se cultiva el arroz y el arroz maleza fue introducido como contaminante de la semilla en las variedades introducidas. En un estudio conducido con marcadores AFLP se evaluó una muestra a nivel nacional de los biotipos colectados en las regiones donde el arroz maleza tiene más presencia. Se estableció que los arroces maleza negros y con aristas largas eran un grupo morfo y genéticamente distinto al que pertenecían los arroces maleza comunes con cáscara color paja y aristas ausentes o cortas en las semillas inferiores de la panoja. La cáscara negra y la presencia de largas aristas son características de plantas salvajes mientras que la coloración de color paja y la ausencia de aristas son características de domesticación que hacen, entre otros caracteres, que la maleza tienda a mimetizarse con el arroz cultivado. Un tercer grupo correspondió a los arroces cultivados, y finalmente, se detectó un cuarto grupo de individuos de arroz maleza producto de la hibridación con las variedades de arroz (Federici *et al.*, 2001). Un biotipo colectado en Minas de Corrales se clasificó genéticamente como del subtipo *aus*, presentando cáscara de color paja con aristas largas (Qiu *et al.*, 2020). La producción de semillas certificadas es un insumo vital para evitar la dispersión de la maleza a las áreas libres de la misma. Con el fin de apoyar el control de calidad de los lotes de semilla básica, se validó el uso de marcadores microsatélites del genoma del arroz. El uso de cuatro marcadores permitió clasificar correctamente el 95% de los arroces maleza y el 99% de las variedades de arroz evaluadas, además de discriminar los híbridos realizados de manera experimental (Garaycochea, 2007).

TECNOLOGÍA CLEARFIELD® EN ARROZ

El arroz resistente a las imidazolinonas es producto de técnicas de mejoramiento tradicionales como la generación de mutaciones inducidas por agentes específicos. Las mutaciones puntuales generadas artificialmente sometiendo semilla de arroz a metanosulfonato de etilo (MSE) consisten en sustituciones de una guanina (G) por una adenosina (A) en tres posiciones diferentes de la secuencia nucleotídica del gen que codifica la ALS, que a su vez determinan distintas sustituciones de aminoácidos en la enzima ALS (Tabla 1) (Rosas *et al.*, 2014).

En EE.UU. se patentó una línea de arroz resistente a imazetapir generada mediante el uso de MSE y seleccionada por aplicación de ese herbicida (Crougham *et al.*, 1996). A partir de ese material, se obtuvieron las variedades de arroz resistente CL121 y CL141 (Louisiana State University, LSU) con la primera mutación, liberadas comercialmente en 2001. Asimismo, por el mismo método, se derivó otra línea del cultivar Cypress que fue la base para la creación

de la variedad CL161 y el híbrido XL8 (RiceTec), iniciándose su comercialización en 2003 (Tan *et al.*, 2005). En Brasil, el Instituto Riograndense del Arroz (IRGA) desarrolló la variedad IRGA 422 CL resistente adaptada localmente por introgresión del gen con la primera mutación que codifica la enzima ALS, sustituyendo en la posición 654 serina por ácido glutámico (Ser₆₅₄Glu) en la secuencia de aminoácidos de la proteína. En cambio, la empresa RiceTec utilizó la mutación encontrada en la segunda generación, que sustituye en la posición 653 serina por aspartato (Ser₆₅₃Asp) en los híbridos Avaxí CL, Inov CL y Sator CL (Lopes *et al.*, 2004). En el mismo período, en el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) obtuvo una mutación distinta que promovía la sustitución en la posición 122 alanina por treonina (Ala₁₂₂Thr), dando origen al cultivar INTA Puitá CL por mutagénesis sobre IRGA 417 (Livore, 2010).

Diez *et al.* (2013) valoró la actividad *in vitro* de la ALS frente al agregado independiente de imazapir e imazapic en materiales que portaban las distintas mutaciones en uso en el país (Tablas 2 y 3).

Tabla 1. Algunos materiales resistentes a las imidazolinonas que estuvieron o están disponibles en el Mercosur.

Materiales resistentes a las imidazolinonas	Origen	Posición de los aminoácidos en la ALS	Estado
IRGA 422 CL	RGS, Brasil	Ser ₆₅₄ Glu	Homocigota
CL161	Louisiana, EE. UU.	Ser ₆₅₃ Asp	«
INTA Puitá CL	Argentina	Ala ₁₂₂ Thr	«
Híbrido Avaxí CL	Brasil	Ser ₆₅₃ Asp	Heterocigota
Híbrido Inov CL	Brasil	Ser ₆₅₃ Asp	«
Híbrido Sator CL	Brasil	Ala ₁₂₂ Thr	«
INTA Gurí CL	Argentina	Ala ₁₂₂ Thr	Homocigota
CL212	Uruguay	Ser ₆₅₃ Asp	«
CL244	Uruguay	Ser ₆₅₃ Asp	«
Titán	Brasil	Ala ₁₂₂ Thr	Heterocigota
Memby porá	Argentina	Ala ₁₂₂ Thr	Homocigota
CL1294	Uruguay	Ser ₆₅₃ Asp	«
CL1202	Uruguay	Ala ₁₂₂ Thr	«

Tabla 2. Coeficientes obtenidos del ajuste del modelo log-logística de cuatro parámetros para las variedades e híbridos portadores de la mutación Ser₆₅₃Asp para cada herbicida considerado.

Material	Principio activo	I ₅₀ (μM) ¹	Error estándar	FR ²	Error estándar	p
INIA Olimar	imazapir	7,65	0,41	-	-	-
Inov CL	imazapir	193,74	49,34	25,3	12,1	0,03
Avaxi CL	imazapir	245,93	29,00	32,1	15,3	0,04
CL146	imazapir	544,21	119,96	71,1	45,5	0,01
INIA Olimar	imazapic	3,77	0,17	-	-	-
Inov CL	imazapic	248,48	79,59	69,9	40,2	0,09
Avaxi CL	imazapic	196,21	40,84	52,1	24,4	0,06
CL146	imazapic	602,68	176,07	159,9	55,4	0,04

¹= I₅₀ es la concentración del herbicida que reduce en un 50% la actividad de la enzima ALS.

²= FR (factor de resistencia) del material de interés/I₅₀ de INIA Olimar (testigo susceptible).

Tabla 3. Coeficientes obtenidos del ajuste del modelo log-logística de cuatro parámetros para las variedades e híbridos portadores de la mutación Ala₁₂₂Thr para cada herbicida considerado.

Material	Principio activo	I ₅₀ (μM) ¹	Error estándar	FR ²	Error estándar	p
INIA Olimar	imazapir	7,65	0,41	-	-	-
APSA CL	imazapir	298,14	93,15	38,9	11,6	0,02
Puitá INTA CL	imazapir	638,64	152,92	80,5	20,3	0,04
INIA Olimar	imazapic	3,77	0,17	-	-	-
APSA CL	imazapic	244,48	75,63	64,5	25,4	0,05
Puitá INTA CL	imazapic	678,57	190,21	179,9	55,4	0,03

¹= I₅₀ es la concentración del herbicida que reduce en un 50% la actividad de la enzima ALS.

²= FR (factor de resistencia) del material de interés/I₅₀ de INIA Olimar (testigo susceptible).

Si bien los distintos materiales no pueden compararse estrictamente ya que cuentan con base genética distinta, se observó que en los híbridos con un solo alelo que ofrece resistencia (heterocigota), independientemente del alelo considerado, alcanzaban un I₅₀ intermedio entre INIA Olimar (testigo susceptible) y las variedades de arroz con dos alelos de resistencia (homocigota). Estas últimas requerían más concentración de herbicida para lograr un 50% de inhibición en la actividad *in vitro* de la ALS. Los

autores señalaron que la relación entre el alelo de resistencia y el alelo susceptible es de codominancia, ya que aparentemente se expresan ambos en los híbridos, aunque no se sabe la proporción; coexistirían enzimas sin mutación (sensible al herbicida) y enzima con mutación (no sensible al herbicida) resultando un fenotipo intermedio (I₅₀). Este hecho está alineado con la recomendación práctica de aplicar dosis menores del herbicida y del coadyuvante asociados sobre el follaje en los híbridos disponibles a

la fecha, comparado con las variedades resistentes.

Familia de las imidazolinonas

Esta familia de herbicidas fue descubierta y desarrollada a inicios de la década de 1980 por la empresa química American Cyanamid, posteriormente adquirida por la empresa BASF. Esta familia pertenece al modo de acción inhibidores de la ALS clasificado como grupo 2/B (WSSA, 2014). Está compuesta por varios principios activos como el imazapir, imazetapir, imazaquín, imazapic e imazamox, entre otros, con acción herbicida de amplio espectro, controlando gramíneas y malezas de hoja ancha anuales y perennes, y ciperáceas, especialmente en cultivos de soja, leguminosas para grano y forrajeras (Tan *et al.*, 2005). En el caso particular del imazapir, como era un herbicida muy persistente, su uso inicial estuvo focalizado en el control de la vegetación en cultivos perennes como la caña de azúcar, palma de aceite, plantaciones de caucho, manejo de arbustivas en el bosque, limpieza de áreas industriales y vías férreas, etc. (Newhouse *et al.*, 1991). En cambio, el imazapic mostró excelente selectividad en el cultivo de maní y en la caña de azúcar, donde era mayormente empleado debido a su persistencia (Anónimo b, BASF). Con el surgimiento de la tecnología Clearfield®, la mezcla pre-formulada de imazapir + imazapic fue posible de usar de manera segura en el cultivo de arroz resistente para el control del arroz maleza y otras especies de interés (Anónimo, 2017, BASF).

Estructura esquelética de las imidazolinonas asociadas al arroz resistente

La estructura básica de la molécula de los herbicidas asociados a la tecnología Clearfield® es la misma. Esta presenta un grupo imidazolinona (- - -) con un enlace =N- que puede recibir un átomo de hidrógeno y protonarse (H⁺) y con un grupo HN que puede perder un átomo de hidrogeno ionizándose y además, tiene un anillo de piridina con un grupo carboxílico (- - -)

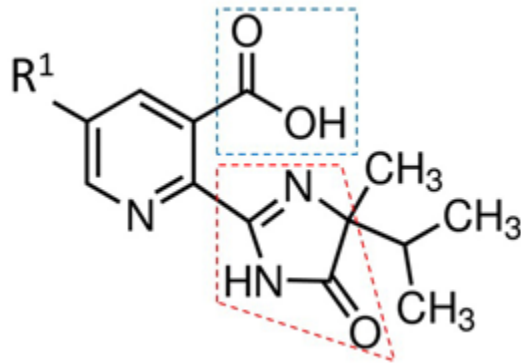


Figura 3. Esquema esquelético básico de los herbicidas usados en el arroz Clearfield®. Estos tienen un grupo imidazolinona (- - -) y grupo carboxílico (- - -). Tomada y modificada de Wepplo, 1991.

que puede también ionizarse (Figura 3). Cuando el radical R¹ es ocupado por un hidrógeno (H) el herbicida será el imazapir, en cambio, si la sustitución es por un grupo metilo (CH₃) el compuesto obtenido es el imazapic, y finalmente, si un grupo etilo (C₂H₅) ocupa el sitio de R¹, el herbicida será imazetapir (Wepplo, 1991).

Modo de acción de las imidazolinonas

Estos herbicidas son absorbidos por la planta por vía foliar y radicular, traslocados por xilema y floema y almacenados en los puntos de crecimiento. Alcanzan el tejido intervascular e ingresan a las células del parénquima. En los cloroplastos hacen contacto con la enzima ALS (también llamada acetohidroxiácido sintasa, AHAS; EC 2.2.1.6). A partir de los precursores piruvato, 2-ketobutirato y acetil-CoA, y mediante vías metabólicas cuyo primer paso en común es la acción de la ALS, ocurre la síntesis de valina, isoleucina y leucina. La biosíntesis de estos aminoácidos ramificados ocurre en los microorganismos y los vegetales, por lo que son esenciales para el crecimiento de los animales dado que no los pueden sintetizar y deben incluirlos en su dieta.

Cuando las imidazolinonas se unen a la ALS provocan la inhibición de su actividad ocurriendo el agotamiento de

las reservas de aminoácidos de cadenas ramificadas, valina, isoleucina y leucina, con la consecuente detención del ciclo celular (Duggleby *et al.*, 2008). La ALS vegetal es una proteína codificada en el núcleo y localizada en cloroplastos. Está compuesta por una subunidad regulatoria, que la hace sensible a la presencia de aminoácidos ramificados. El sitio de acción de estos herbicidas es el bloqueo del canal de acceso del sustrato sobre el que opera la enzima. En base a mutagénesis dirigida, se han identificado cinco sitios específicos de reconocimiento del herbicida o sitios de acople en la ALS cuyas secuencias aminoacídicas son conservadas. Esto quiere decir que esas secuencias han permanecido incambiables durante la evolución a través de un largo período de tiempo. Un dominio puede ser una región de la proteína con un interés biológico funcional o estructural, por ejemplo el canal de acceso del sustrato. Los sitios de acople son A, C y D en el dominio alfa, el sitio B en el dominio delta, y el sitio E en el extremo C-terminal de la secuencia de aminoácidos (Shivrain, 2010).

Comportamiento de las imidazolinonas en el agua y suelo

Tanto el imazapir como el imazapic e imazetapir se comportan como un ácido débil en la solución del suelo, determinando el pH la dinámica de su comportamiento. La constante de ionización es el valor de pH al cual la molécula de herbicida se encuentra en equilibrio entre dos de sus formas que prevalecen a ese pH (Tabla 4). En la curva de titulación se relaciona el aumento en el pH con la composición de los distintos esta-

dos del compuesto y se observan distintos puntos de inflexión. El primero se refiere al pK_1 , que es cuando se protona el anillo de la imidazolinona (incorpora un hidrógeno y queda con carga positiva), el pK_2 se presenta cuando el grupo carboxílico se ioniza (pierde un hidrógeno y la carga queda negativa), mientras que el último punto de inflexión, el pK_3 , es debido a que se pierde un hidrógeno del grupo imidazolinona (HN), quedando con carga negativa ese grupo (Wepplo, 1991).

En los suelos de pH mayor a 5 se espera que una proporción muy alta del herbicida esté presente bajo su forma ionizada, con carga negativa en el grupo carboxilo, siendo menos retenido en la matriz del suelo y más soluble en agua. Sin embargo, en los suelos con pH por debajo de 5 (suelos más ácidos) la forma no ionizada, sin cargas, tendrá cierta proporción, sin ser mayoritaria, siendo muy relevante su papel dado que se comportará como un herbicida no iónico, uniéndose de manera reversible a la materia orgánica del suelo (Mangels, 1991). Al hacerse presente la forma no ionizada a pH más bajo, determinará que el herbicida sea menos soluble en agua y más lipofílico, es decir tendrá mayor afinidad por la materia orgánica del suelo. Las pérdidas por volatilización para estos tres compuestos serán negligibles debido a su muy baja presión de vapor (Wepplo, 1991).

La disipación de estos principios activos en el agua ocurre muy rápidamente. Esta característica se estima bajo condiciones de laboratorio en agua destilada sin partículas en suspensión que puedan interferir. El mecanismo principal de disipación es la fotólisis inducida por la

Tabla 4. Algunas propiedades químicas de los herbicidas usados en el arroz Clearfield®.

Herbicidas	Constante de ionización			Solubilidad en agua* mg/l	Presión de vapor Pa
	pK_1	pK_2	pK_3		
Imazapir	1,9	3,6	11,0	11272	$<1,3 \times 10^{-5}$
Imazapic	2,0	3,9	11,1	2200	$<1,3 \times 10^{-7}$
Imazetapir	2,1	3,9	-	1400	$1,3 \times 10^{-5}$

*=medida a pH 7 y 25 °C. Herbicide Handbook, WSSA, Tenth Edition, 2014.

Tabla 5. Vida media de las imidazolinonas y otros herbicidas usados en arroz Clearfield® en las matrices agua y suelo.

Matriz Herbicidas	Agua destilada días	Suelo a campo días
Imazapir	1 - 2	25 - 142
Imazapic	sd	120
Imazetapir	46 h	60 - 90
Quinclorac	sd	360
Clomazone	sd	16 - 36
Penoxulam	sd	5 - 16
Bispiribac-sodio	sd	<10

Herbicide Handbook, WSSA, Tenth Edition, 2014. sd=sin datos.

fracción ultravioleta de la radiación solar (Mangels, 1991). Sin embargo, en el suelo esos mecanismos de disipación no operan y estos herbicidas tienden a persistir más que otros herbicidas usados en el arroz, con la excepción del quinclorac, teniendo el potencial para afectar a los cultivos subsiguientes sensibles (Tabla 5).

Los residuos de las imidazolinonas se degradan vía microbiana en presencia de oxígeno (aerobiosis). Para que esto ocurra tienen que estar disponibles en la solución del suelo, así los microorganismos acceden a los mismos para metabolizarlos. El coeficiente de adsorción de Freundlich (K_f) nos indica si los residuos están más o menos adheridos a la fase sólida o libre en la fase acuosa del suelo. Cuanto más elevado el valor, mayor la proporción de los residuos que estarán adheridos al suelo. Un ejemplo bien ilustrativo es el comportamiento del imazetapir en esa matriz. Este herbicida alcanzó un valor de K_f de 232,22 y 41,59 en un suelo con un contenido de materia orgánica alta mientras que en uno de bajo contenido los valores obtenidos para el K_f fueron de 12,53 y 2,83 cuando se ajustó el pH a 5 y a 6 respectivamente. Cuando el pH del suelo está en 5, el imazetapir adsorbido aumenta, similarmente opera el contenido de materia orgánica entre suelos. En consecuencia, la disponibilidad de los residuos de las imidazolinonas en la solución del suelo regula la extensión de la degradación

microbiana, mientras que una mayor adsorción aumentará la persistencia de estos herbicidas. La velocidad de la disipación de estos herbicidas es dependiente de la temperatura y la humedad del suelo. Pasar de temperaturas de 18 a 35 °C y contenido de humedad desde marchitez permanente (-15 kPa) a capacidad de campo (-33 kPa) favorecen la rápida degradación. En ausencia de oxígeno (anaerobiosis) no se detectó una degradación significativa ni del imazapir ni tampoco del imazetapir por un período de incubación de dos meses, permaneciendo intacto estos herbicidas y contribuyendo a la persistencia en el suelo (Mangel, 1991).

En nuestro país se ofrece el herbicida conteniendo 52,5% p/p de imazapir + 17,5% p/p de imazapic, recomendándose dos aplicaciones de 140 g/ha de KIFIX® con coadyuvante tensioactivo no iónico al 0,25%. La primera en preemergencia y la segunda con el arroz entre 2 a 4 hojas en postemergencia temprana (Anónimo, BASF, 2017). La realización de la aplicación en preemergencia si hay poca humedad en superficie y no hay previstas precipitaciones en la semana siguiente a la aspersión debe ir acompañada de un baño para asegurar que el herbicida se active y quede disponible para la absorción por las semillas de las malezas germinando. En caso de existir arroz maleza nacido u otro tipo de vegetación, se aconseja mezclar en el tanque KIFIX® con

un producto comercial en base a glifosato. Con respecto a la aplicación en postemergencia temprana, se debe tratar de aplicar con el arroz maleza preferentemente sin macollar y ajustar la dosis de KIFIX® en función de la población de la maleza (Batalla y Fernández, 2007). El manejo de la inundación podría postergarse unos días más de lo habitual en aplicaciones en postemergencia temprana, sin embargo, para no perder eficacia de control se aconseja no demorar la inundación más allá de los 7 días después de la aplicación en postemergencia tardía (Avila *et al.*, 2017). En el caso concreto del imazapir, existe información indicando que alcanza excelentes niveles de control de malezas perennes con dosis menores a temperatura más frescas que a temperaturas elevadas (Malefy y Quakenbush, 1991).

BIBLIOGRAFÍA

- Anónimo.** 2017. Etiqueta KiFiK. BASF.
- Anónimo a.** n.d. 7 pasos para el control del arroz rojo y malezas difíciles. BASF. <https://documents.basf.com/7ee3065b4f4d6d5a6122d5209391560741fbdaa1/Folleto%20-%20Clearfield.pdf>
- Anónimo b.** 2020. Cadre® 70 DG, herbicida para caña de azúcar y maní. BASF. <https://agriculture.basf.com/ar/es/proteccion-decultivos-y-semillas/productos/cadre-70-dg.html>
- Avila, L.A.; Senseman, S.A.; McCauley, G.N.; Chandler, J.M.; O'Barr, J. H.** 2017. Effect of flood timing on red rice (*Oryza sp.*) control with imazethapyr applied at different dry-seeded rice growth stages. *Weed Technology*, 19(2), 476–480. <https://doi.org/10.1614/WT-04-181>
- Batalla, C.; Fernández, N.** 2007. Eficiencia del imazapir y del imazapic aplicados sobre arroz Clearfield® en el control de malezas. Montevideo: Facultad de Agronomía. (UDELAR).
- Crougham, T.P.; Utomo, H.S.; Sanders, D.E.; Braverman, M.P.** 1996. Herbicide-resistant rice offers potential solution to red rice problem. *Louisiana Agriculture*, 39(4), 10–12.
- Delouche, J.C.; Burgos, N.R.; Gealy, D.R.; Martin, G.Z.D.S.; Labrada, R.** 2007. Weedy rices - origin, biology, ecology and control. 156 p. (FAO Plant Production and Protection Paper, 188).
- Diarra, A.; Smith, R.J.; Talbert, R.E.** 1985. Red rice (*Oryza sativa*) control in drill-seeded rice (*O. sativa*). *Weed Science*, 33(5), 703–707. <https://doi.org/10.1017/S0043174500083120>
- DIEA/MGAP.** 2009. Encuesta arrocera. Zafra 2008/2009. In: Estadísticas Agropecuarias (p. 26).
- Diez, M.; Bonnacarrere, V.; Saldain, N.E.** 2013. Evaluación in vitro de la actividad de la acetolactato sintasa ante los ingredientes activos del Kifix en arroz Clearfield. In INIA (Ed), Arroz-Soja Resultados Experimentales 2012-2013. Treinta y Tres: INIA, 2013. cap5, p. 6-8. (INIA Actividad de Difusión;713)
- Duggleby, R.G.; McCourt, J.A.; Guddart, L.W.** 2008. Structure and mechanism of inhibition of plant acetohydroxy acid synthase. *Plant Physiology and Biochemistry* 46(3): 309–24. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.12.004>
- Federici, M.T.; Vaughan, D.; Tomooka, N.; Kaga, A.; Wang, X.; Doi, K.; Francis, M.; Zorrilla, G.; Saldain, N.** 2001. Analysis of Uruguayan weedy rice genetic diversity using AFLP molecular markers. *Electronic Journal of Biotechnology* 4(3). <https://doi.org/10.2225/vol4-issue3-fulltext-3>
- Garaycochea, S.** 2007. Clasificación asistida por marcadores moleculares para diferenciación de biotipos con características de maleza y cultivares comerciales de arroz. <http://www.bib.fcien.edu.uy/files/etd/pasan/uy24-12500.pdf>
- Gealy, D.; Agrama, H.; Eizenga, G.** 2009. Exploring genetic and spatial structure of US weedy red rice (*Oryza sativa*) in relation to rice relatives worldwide. *Weed Science*, 57, 627–643. <https://doi.org/10.1614/WS-09-018.1>
- Gealy, D.R.; Tai, T.H.; Sneller, C.H.** 2002. Identification of red rice, and hybrids populations using microsatellite markers. *Weed Science*, 50, 333–339. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0333:IORRRA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0333:IORRRA]2.0.CO;2)

- Gigena, N.; Moreira, A.L.** 2002. Uso de hidracida maleica y glifosato en la supresión de la semillazón del arroz rojo (*Oryza sp.*) y su efecto en el rendimiento y calidad industrial de INIA Tacuarí (*Oryza sativa*). Montevideo:Facultad de Agronomía, UDELAR.
- Grimm, A.; Fogliatto, S.; Nick, P.; Ferrero, A.; Vidotto, F.** 2013. Microsatellite markers reveal multiple origins for Italian weedy rice. *Ecology and Evolution* 3(14):4786–98. <https://doi.org/10.1002/ece3.848>
- Grimm, A.; Sahi, V.P.; Amann, H.; Vidotto, F.; Fogliatto, S.; Devos, K.M.; Ferrero, A.; Nick, P.** 2020. Italian weedy rice – A case of de-domestication? *Ecology and Evolution* 10(15): 8449–8464. <https://doi.org/10.1002/ece3.6551>
- Gross, B.L.; Reagon, M.; Hsu, S.C.; Caicedo, A.L.; Jia, Y.; Olsen, K.M.** 2010. Seeing red: the origin of grain pigmentation in US weedy rice. *Molecular Ecology* 19(16):3380–3393. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2010.04707.x>
- Gu, X.Y.; Foley, M.E.; Horvath, D.P.; Anderson, J.V.; Feng, J.; Zhang, L.; Mowry C.; Ye, H.; Suttle, J.; Kadowaki, K.; Chen, Z.** 2011. Association between seed dormancy and pericarp color is controlled by a pleiotropic gene that regulates abscisic acid and flavonoid synthesis in weedy red rice. *Genetics*, 189(4), 1515–1524. <https://doi.org/10.1534/genetics.111.131169>
- Kwon, S.L.; Smith, R.J.; Talbert, R.E.** 1992. Comparative growth and development of red rice (*Oryza sativa*) and rice (*O. sativa*). *Weed Science*, 40(1), 57–62. <https://doi.org/10.1017/S0043174500056952>
- Lentini, Z.; Espinoza, A.M.** 2005. Coexistence of weedy rice and rice in tropical America -Gene flow and genetic diversity. In: Gressel, J. (Ed.), *Crop ferality and volunteerism*. BocaRaton: CRC Press; Taylor & Francis Group. pp. 305–322.
- Li, L.; Li, Y.; Jia, Y.; Caicedo, A.L.; Olsen, K.M.** 2017. Signatures of adaptation in the weedy rice genome. *Nature Genetics*, 49(5), 811–816. <https://doi.org/10.1038/ng.3825>
- Li, L.F.; Olsen, K.** 2020. Population genomics of weedy crop relatives: Insights from weedy rice. In: O. P. Rajora (Ed.). *Population genomics: crop plants*. Springer Nature Switzerland. p. 25.
- Livore, A.B.** 2010. Nueva variedad de arroz no transgénica resistente a herbicida, PUITA INTA CL. In: Torres, C. J.; Senigagliesi, C. (Eds.). *INTA expone sus aportes al país*. Buenos Aires: INTA. pp. 25–26.
- Malefy, T.; Quakenbush, L.** 1991. Influence of environmental factors on the biological activity of the imidazolinone herbicides. In: Shaner, D.L.; O'Connor, L. (Eds.). *The imidazolinone herbicides*. Boca Raton: CRC Press. p. 289.
- Mangels, G.** 1991. Behavior of the imidazolinone herbicides in soil - A Review of the Literature. In: Shaner, D.L.; O'Connor, S.L. (Eds.). *The imidazolinone herbicides*. Boca Raton: CRC Press. p. 191.
- MGAP.** 1988. Comercialización arroz cáscara. Decreto 321/988.
- Newhouse, K.E.; Wang, T.; Anderson, P.C.** 1991. Imidazolinone resistant crops. In: Shaner, D.L.; O'Connor, S.L. (Eds.). *The imidazolinone herbicides*, Boca Raton: CRC Press, p. 139.
- Nunes, A.L.; Delatorre, C.A.; Merotto, A.** 2014. Gene expression related to seed shattering and the cell wall in cultivated and weedy rice. *Plant Biology*, 16(5), 888–896. <https://doi.org/10.1111/plb.12133>
- Pipatpongpinoy, W.; Korkmaz, V.; Wu, H.; Kena, A.; Ye, H.; Feng, J.; Gu, X.-Y.** 2020. Assembling seed dormancy genes into a system identified their effects on seedbank longevity in weedy rice. *Heredity*, 124:135–145. <https://doi.org/10.1038/s41437-019-0253-8>
- Qiu, J.; Jia, L.; Wu, D.; Weng, X.; Chen, L.; Sun, J.; Chen, M.; Mao, L.; Jiang, B.; Ye, C.; Turra, G.M.; Guo, L.; Ye, G.; Zhu, Q.; Imaizumi, T.; Song, B.; Scarabel, L.; Merotto Jr, A.; Olsen, K.M.** 2020. Diverse genetic mechanisms underlie worldwide convergent rice feralization. *Genome Biology*, 21:70. <https://doi.org/10.1186/s13059-020-01980-x>

- Qiu, J.; Zhou, Y.; Mao, L.; Ye, C.; Wang W.; Zhang, J.; Yu, Y.; Fu, F.; Wang, Y.; Qian, F.; Qi, T.; Wu, S.; Sultana, M.H.; Cao, Y.; Wang, Y.; Timko, M.P.; Ge, S.; Fan, L.; Lu, Y.** 2017. Genomic variation associated with local adaptation of weedy rice during de-domestication. *Nature Communications*. art. num. 15323. <https://doi.org/10.1038/ncomms15323>
- Rosas, J.E.; Bonnacarrère, V.; Pérez de Vida, F.** 2014. One-step, codominant detection of imidazolinone resistance mutations in weedy rice (*Oryza sativa* L.). *Electron J Biotechnol [Internet]* 17(2):95–101. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0717345814000293>
- Shivrain, V.K.; Burgos, N.R.; Agrama, H.A.; Lawton-Rauh, A.; Lu, B.; Sales, M.A.; Boyett, V.; Gealy, D.R.; Moldenhauer, K.A.K.** 2010. Genetic diversity of weedy red rice (*Oryza sativa*) in Arkansas, USA. *Weed Research*, 50(4), 289–302. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00780.x>
- Smith, R.J.** 1988. Weed thresholds in southern U.S. rice, *Oryza sativa*. *Weed Technology*, 2(3), 232–241. <https://doi.org/10.1017/S0890037X00030505>
- Sweeney, M.T.; Thomson, M.J.; Pfeil, B.E.; MCCouch, S.** 2006. Caught red-handed: Rc encodes a basic helix-loop-helix protein conditioning red pericarp in rice. *Plant Cell*, 18(2), 283–294. <https://doi.org/10.1105/tpc.105.038430>
- Tan, S.; Evans, R.R.; Dahmer, M.L.; Singh, B.K.; Sahner, D.L.** 2005. Imidazolinone-tolerant crops: history, current status and future. *Pest Management Science*, 61:246-257. <https://doi.org/10.1002/ps.993>
- Tong, J.; Han, Z.; Han, A.** 2021. Genetic análisis and molecular mapping of Rp, a mutant gene encoding red pericarp in rice (*Oryza sativa* L.). *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding* 57(2):51-57 <https://doi.org/10.17221/70/2020-CJGPB>
- Topolansky, E.** 1975. *El Arroz. Su cultivo y producción*. Buenos Aires: Hemisferio Sur. 304 p.
- Vaughan, D.A.; Sanchez, P.L.; Ushiki, J.; Kaga, A.; Tomooka, N.** 2005. Asian Rice and Weedy Rice. *Evolutionary Perspectives*. In: Gressel, J. (Ed.). *Crop ferality and volunteerism*. Boca Raton: CRC Press; Taylor & Francis. p. 257-273.
- Vigueira, C.C.; Li, W.; Olsen, K. M.** 2013. The role of Bh4 in parallel evolution of hull colour in domesticated and weedy rice. *J. Evol. Biol.*, 26, 1738–1749.
- Wepplo, P.J.** 1991. Chemical and physical properties of the imidazolinones. In: Shaner, D.L.; O'Connor, S.L. (Eds.). *The imidazolinone herbicides*. Boca Raton: CRC Press. p. 289.
- Zorrilla, G.** 1992. Arroz rojo. Conózcalo y combátalo. Montevideo: INIA Uruguay. p. 19. (Boletín de Divulgación; 20). <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2717/1/111219240807154749.pdf>
- Zorrilla, G.; Pereira, A.L.; Oxley, M.; Acevedo, A.** 2011. Longevidad de semillas de variedades de arroz y de biotipos de arroz rojo y negro en el suelo. In INIA (Ed.), *Arroz: Resultados Experimentales 2010-2011*. Treinta y Tres: INIA 2011. Cap. 8 p.2-10. (INIA, Serie Actividades de Difusión; 651).

2 - RECOMENDACIONES PARA UN MANEJO SUSTENTABLE DEL ARROZ RESISTENTE A IMIDAZOLINONAS Y HERRAMIENTAS DE APOYO DISPONIBLES

N.E. Saldain¹, C. Marchesi²

PALABRAS CLAVE: arroz maleza, imazapir + imazapic, servicios, sistema

INTRODUCCIÓN

El uso de arroz resistente a imidazolinonas (IMIs) y su herbicida asociado, se recomienda en situaciones donde las poblaciones esperables de arroz maleza (AM) sean muy densas o con una distribución espacial muy dispersa, que hace muy difícil de eliminarlo manualmente o con la aplicación localizada de un herbicida total.

En Uruguay, a la fecha, el herbicida usado en este sistema es una mezcla preformulada de imazapir + imazapic (52,5 g/l + 17,5 g/l, respectivamente). Esta mezcla permite controlar de manera selectiva no sólo al AM, sino también a otras gramíneas anuales y perennes, malezas de hojas ancha y ciperáceas.

Se urge a no usar esta tecnología en chacras libres de AM o en chacras que se haya identificado de manera positiva o se tenga fundada sospecha de la existencia de individuos resultantes del cruzamiento entre el AM con el arroz cultivado resistente.

RECOMENDACIONES DE USO

La aplicación sistemática y esmerada de las prácticas de manejo indicadas por la empresa que ofrece esta tecnología, además también recomendadas por INIA,

son indispensables para mantener la eficacia del control de las malezas en una chacra en particular en el tiempo.

Las recomendaciones generales son:

1. utilización en la siembra de únicamente semilla certificada;
2. realización de dos aplicaciones de la premezcla de imazapir + imazapic en las dosis y momentos recomendados en la etiqueta del herbicida, una en preemergencia (PRE) y otra en postemergencia temprana (POST), con V2-V4 hojas en el arroz;
3. en PRE, si no hay suficiente humedad en el suelo o ausencia de precipitaciones, bañar a la semana de la aplicación para activar el herbicida;
4. en POST, comenzar la inundación a los dos días posteriores de la aplicación del herbicida;
5. eliminación de las plantas de AM que escapen al herbicida, manualmente o con aplicaciones de precisión, quemando los restos extraídos en caso de eliminación manual;
6. realización de hasta dos cultivos consecutivos con variedades resistentes a IMIs;
7. inclusión de otro cultivo como la soja resistente al glifosato o pasturas sembradas para ganadería o cultivos de

¹ Néstor Saldain. Ing. Agr. M.Sc. INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz (hasta junio 2021). nsaldain56@gmail.com

² Claudia Marchesi. Ing. Agr. M.Sc. Ph.D. INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz. cmarchesi@inia.org.uy

- cobertura que aseguran bajar la presión de selección de las IMLs sobre las poblaciones de malezas, atrasando el surgimiento de la resistencia al herbicida;
- atención cuidadosa en la limpieza de tractores, cosechadoras y herramientas como las hojas niveladoras (landplane) y rastras de discos cuando salen de áreas con infestación de AM;
 - conservación de los caminos, auxiliares de riego y drenajes libre de AM.

Además, hay algunas especificaciones adicionales a las recomendaciones mencionadas, para el manejo de la tecnología en situaciones particulares, como:

El uso de arroz resistente a IMLs por primera vez en un sistema; se recomienda:

- una aplicación en PRE de imazapir + imazapic seguida de otra en POST;
- usar dosis de etiqueta para una infestación media de AM; en casos de infestación alta con manchones muy densos ajustar la dosis;
- si ajusta la dosis, de preferencia hacerlo en la PRE;
- si ajusta la dosis en POST, tiene más chance de dejar residuos remanentes del herbicida

Cuando se retorna a un potrero que tiene un año de descanso del arroz resistente a IMLs, se recomienda:

- realizar laboreo de verano;
- bajar gradualmente la intensidad de uso de variedades resistentes en los años siguientes, evitando repetir 2 cultivos consecutivos;
- si es requerido ajustar dosis, seguir criterios mencionados arriba

El cultivo de arroz resistente a IMLs de segundo año o alternado con chacra anterior de variedad resistente se recomienda:

- realizar laboreo de verano para evitar acumulación de residuos de los herbicidas;
- es necesario incluir otros herbicidas para evitar resistencia del capín a las IMLs;
- en PRE, mezclar imazapir + imazapic con clomazone y/o glifosato (arroz emergido o no);

- en POST, mezclar imazapir + imazapic con clomazone, propanil, florpiauxifen-benzil o quinclorac;
- si es requerido ajustar dosis, seguir los criterios mencionados anteriormente;
- inundación a partir de los dos días posteriores a la aspersión POST.

¿QUÉ OTROS CULTIVOS PUEDO INCORPORAR AL SISTEMA?

Las recomendaciones de qué cultivos se pueden incorporar en un sistema luego de haber utilizado arroz resistente a IMLs, va a depender del nivel acumulado y de la distribución vertical de los residuos del imazapir + imazapic y de la susceptibilidad de las especies a incluir. La acumulación de los residuos es un balance resultante entre las acciones que favorecen la persistencia y aquellas que contribuyen a su disipación.

A saber, favorecen la acumulación:

- el uso reiterado de arroz resistente y el correspondiente herbicida;
- la ausencia del laboreo o un laboreo muy superficial del suelo;
- solo realizar aplicaciones en POST y a dosis muy elevadas;
- precipitaciones voluminosas, riego o establecimiento de la inundación cercana a las aplicaciones del herbicida tanto en PRE como POST facilitan la incorporación al suelo;
- el pH del suelo;
- contenido de carbono orgánico del suelo elevado;
- mayor profundidad del horizonte superficial;

Mientras que, la disipación de los residuos del herbicida es facilitada por:

- la humedad del suelo a capacidad de campo, la temperatura y el contenido de oxígeno elevados estimulan la degradación por microorganismos del suelo;
- el drenaje de las chacras y la ruptura de taipas inmediatamente después de la cosecha;

3. el laboreo frecuente del suelo para traer los residuos del herbicida hacia la superficie;
4. el laboreo de verano previo a la siembra del arroz siguiente;
5. la fertilización fosfatada adecuada que favorezca el crecimiento de las leguminosas;
6. la siembra de mezclas forrajeras con trébol blanco y lotus;
7. un ajuste leve del pH cuando está por debajo de 5,2 por medio del encalado del suelo para reducir toxicidad por aluminio en las leguminosas sensibles;
8. la siembra de trébol persa al voleo temprano sobre el rastrojo de arroz.

En general, hasta donde se ha experimentado con las especies utilizadas en rotación con arroz resistentes a las IMIs, el daño por los residuos de imazapir + imazapic no se traducen en una reducción de la población inicial de plantas y por ende no se ve afectada su implantación. El daño se aprecia en la reducción de la productividad en los cultivos siguientes sensibles y la magnitud del mismo está en función de la cantidad de residuos del herbicida acumulados en el horizonte superficial.

En suelos de textura arenosa, profundos, con bajos contenido de carbono orgánico y pH por debajo de 5,0 después de dos años de arroz resistente a IMIs usando dosis de etiqueta, valore que:

- si decide sembrar raigrás o trébol rojo solos o mezclados sobre el rastrojo, la pérdida de la materia seca producida puede alcanzar un 50%;
- se puede sembrar una mezcla de trébol blanco y lotus (especies tolerantes) y raigrás (especie susceptible) sobre el rastrojo de arroz, pudiéndose reducir la productividad en un 20-25%;
- no sembrar sorgo ni variedades convencionales de arroz durante dos años;
- si siembra soja, las plantas quedarán más bajas debido a menor número de nudos y entrenudos más cortos, además, tendrán menor diámetro de tallo estando los daños y la pérdida de ren-

dimiento en función de la cantidad de residuos acumulados en el horizonte superficial presentes al momento de la siembra.

En suelos limosos o francos, poco profundos y de pH mayor a 5,0, después de dos años de arroz resistente a IMIs, y habiendo usado dosis de etiqueta valore que:

- si siembra raigrás solo sobre el rastrojo, en uno de cuatro años puede tener pérdidas de productividad del orden del 25%;
- si siembra la mezcla de trébol blanco, lotus y raigrás sobre el rastrojo de arroz, en uno de cuatro años puede reducirse la productividad en el orden del 30%;
- se puede sembrar trébol rojo y raigrás sobre rastrojo de arroz;
- no se aconseja laborear inmediatamente a la cosecha del arroz y la siembra de pradera a fines del otoño porque no se permite una adecuada disipación de los residuos del herbicida traídos hacia la superficie desde el horizonte subsuperficial;
 - el raigrás es severamente afectado;
 - trébol blanco y lotus sufren daños leves que luego se recuperan (síntoma púrpura y/o rojizo en el borde de la lámina de los folíolos el primero y nervaduras en el envés de los folíolos en el segundo);
- no sembrar sorgo o variedades convencionales de arroz por un año;
- si siembra soja, las plantas quedarán más bajas por menor número de nudos, entrenudos más cortos y menor diámetro de tallo siendo pérdida de productividad en función de la acumulación de residuos presentes al momento de la siembra.

En suelos arcillosos con contenido alto de materia orgánica, profundos y de pH > 5,5, después de dos años de arroz resistente a IMIs y habiendo usado dosis de etiqueta valore que:

- se puede sembrar raigrás, trébol rojo, blanco o lotus directamente sobre el rastrojo de arroz;

- se puede sembrar sorgo y arroz convencional al año siguiente;
- se recomienda aumentar la densidad de siembra entre un 10 a 20% para diluir los residuos entre más plántulas.
- si siembra soja, las plantas quedarán más bajas por menor número de nudos, entrenudos más cortos y menor diámetro de tallo, siendo la pérdida de productividad función de la acumulación de residuos presentes al momento de la siembra.

HERRAMIENTAS DE APOYO DISPONIBLES

Desde 2012 se cuenta en INIA con un servicio de detección de AM resistente a IMIs^a por medio de marcadores moleculares. El mismo ha procesado más de 500 muestras de AM identificando algo más de la mitad como tipos resistentes, detallándose la información en el capítulo 5 de esta publicación. Además, para la detección de resistencia en el capín se sabe la concentración del herbicida que

separa biotipos susceptibles de resistentes, permitiendo establecer distintos niveles de resistencia cuando se emplea siguiendo el procedimiento protocolizado sobre semillas colectadas de individuos que escaparon al control.

Como existe la deriva de herbicida de chacras con arroces resistentes a las IMIs hacia variedades de arroz no resistentes u otros cultivos susceptibles, también ocurre así con la absorción de los residuos del herbicida acumulados en el suelo. Si bien los síntomas son una guía muy útil en la identificación del herbicida responsable del daño en la planta, a veces los mismos son confusos o poco claros. La determinación de los residuos de imazapir en planta es una herramienta objetiva que contribuye a la pesquisa del origen del problema y facilita la búsqueda de soluciones. El asesoramiento para la toma de muestras y la determinación analítica son realizadas por el Grupo de Análisis de Compuestos Traza, Departamento de Química del Litoral, CENUR del Litoral Norte, sede Paysandú. Universidad de la República^b.

^aServicio de detección de AM resistente a IMI, Laboratorio Biotecnología INIA Treinta y Tres, Ruta 8, Km 281, Tel: 44522023.

^bRuta 3 km 363. Paysandú. Tel.: 47227950 int. 135.

3 - IMPORTANCIA DE LA SEMILLA CERTIFICADA EN LA CONTENCIÓN DEL ARROZ MALEZA

A. L. Pereira¹

PALABRAS CLAVE: arroz rojo, calidad de semilla, certificación, *Oryza sativa*

INTRODUCCIÓN

La semilla es un vehículo importante de propagación de arroz maleza (AM) en la cadena productiva del arroz en diversos países. Uruguay ha desarrollado por 50 años un programa de certificación de semillas que le ha permitido un efectivo control del AM, eliminando a la semilla como fuente relevante de contaminación de las chacras de arroz, evitando de esta forma su dispersión y mayor presencia. En el área sembrada con el cultivo de arroz en la zafra 2019-2020 se usó semilla certificada en un 94% de la misma, manteniéndose en porcentajes superiores al 90% desde el año 2005 (INASE, 2020). Cabe destacar que desde hace varios años el uso de semilla de variedades creadas en el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria es de más de 80% del área sembrada. Una de las grandes ventajas de utilizar semilla certificada en casi la totalidad del área de siembra es asegurar la pureza física y genética, evitando por lo tanto la diseminación de malezas en los cultivos a través de este medio. Como la semilla es la principal fuente de contaminación de nuevas áreas y la reintroducción en sitios sin presencia de maleza, esta medida es un control fundamental para mantener niveles bajos de infestación de AM y ha sido muy efectiva en Uruguay. Pero esto no siempre ha sido así y hubo cambios importantes en la presencia de la maleza en las chacras a partir del momento que se creó el Programa de Certificación de semillas de arroz. Este capítulo relata cómo funciona el Sistema Nacional para Producción de Semilla de

Arroz, cómo se ha logrado llegar a sembrar casi la totalidad del área con semilla certificada y cómo repercute este hecho en el control del AM.

SISTEMA NACIONAL PARA PRODUCCIÓN DE SEMILLA DE ARROZ

El sector arrocero uruguayo posee una fuerte integración de toda la cadena – productores, industria, investigación y Estado – que ha permitido el desarrollo de éste en un marco de acuerdos y seguridad para lograr los mejores resultados productivos. La cadena se encuentra integrada por la Asociación de Cultivadores de Arroz (ACA), la Gremial de Molinos Arroceros (GMA), Coopar, el Instituto Nacional de Semillas (INASE) y el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). La producción de arroz es realizada mediante un contrato anual que define la obligación del productor a remitir su arroz a la industria que le provee la semilla. La industria provee asistencia técnica y financiera a sus productores, les proporciona la semilla certificada que van a utilizar y el costo de ésta se le descuenta al productor en el pago final del arroz obtenido. El asegurar buena calidad de la semilla utilizada por los productores disminuye los problemas de contaminación de chacras por esta vía, resultando beneficioso para todos los involucrados en la cadena productiva. Las excepciones a este sistema las constituyen algunos cultivares de calidades

¹ Ana Laura Pereira. Ing. Agr. D. Sc. INIA. Unidad de Semillas. apereira@inia.org.uy

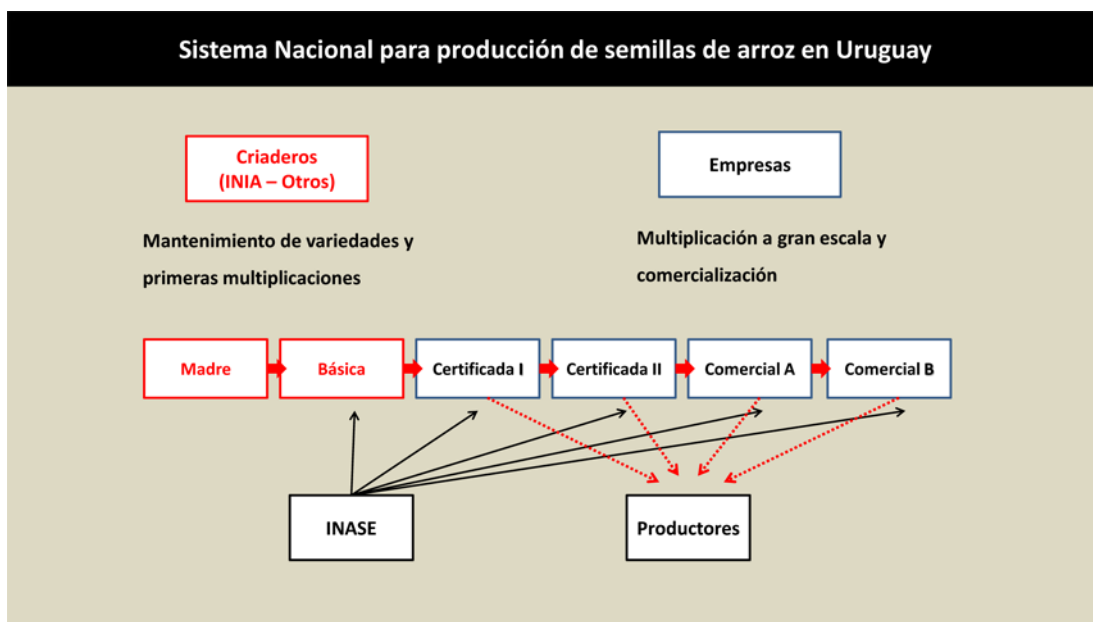


Figura 1. Esquema explicativo del Sistema Nacional para Producción de Semillas de Arroz en Uruguay, sus categorías de multiplicación y actores involucrados.

especiales producidos por las empresas en áreas muy reducidas y productores que no utilizan semilla certificada sino semilla de uso propio. Cabe aclarar que el arroz no es una especie de certificación obligatoria a nivel de la legislación vigente, si no que el sistema lo determina de esta forma.

La producción de semilla de arroz en Uruguay involucra varios actores que abastecen a los productores bajo un sistema de multiplicación generacional de semilla (Figura 1). Se inicia con pequeños volúmenes de alta pureza genética, sanitaria y fisiológica con sucesivas multiplicaciones que conformarán las distintas categorías de semilla.

Las categorías son producidas bajo el proceso de certificación, el cual se realiza siguiendo normas específicas de producción mediante controles de calidad en todas sus etapas, incluyendo el conocimiento del origen genético y el control de las generaciones.

Las semillas madre y básica son producidas por los criaderos, en su mayoría por el obtentor de las variedades o representantes del obtentor en el país (INIA y empresas). Las clases siguientes certificadas y comercial son producidas por las empresas

arroceras que compran la semilla básica a INIA y demás empresas. Éstas seleccionan productores que cumplan con determinados requisitos para su multiplicación. La industria paga a los productores de semilla por la multiplicación de semillas un valor previamente acordado, en general el doble del valor del grano. Luego la distribuye entre todos los productores que remiten a su molino, asegurando así el abastecimiento de semilla necesaria para el área de producción y el control del uso de semilla certificada.

El Instituto Nacional de Semillas (INASE) actúa controlando todas las etapas de producción excepto la semilla madre que es de responsabilidad exclusiva del criadero.

Existen dos sistemas de certificación habilitados por INASE: el convencional y el acreditado. El sistema convencional de control es realizado directamente por los técnicos de INASE, quienes verifican el cumplimiento de los requisitos establecidos en los estándares específicos en cada una de las etapas de producción. Desde el año 2000, el sistema cuenta con un mecanismo de control realizado por las empresas. En este sistema las empresas se acreditan y sus técnicos

realizan ese trabajo y son auditados por INASE en diferentes instancias. En la zafra 2020-2021 nueve empresas arroceras multiplican semilla certificada, de ellas tres producen bajo el esquema de certificación acreditada y el resto lo hace bajo el sistema convencional. Las empresas acreditadas manejan actualmente el 83% del área total de semilleros de arroz cultivados (Com. pers. Tarán, 2020).

PRODUCCIÓN DE SEMILLA DE ARROZ

El mantenimiento de un cultivar con sus características propias y su semilla pura, así como la obtención de los volúmenes necesarios para cubrir la demanda de los productores, requiere de sucesivas multiplicaciones controladas de semilla. A continuación, se describen las distintas etapas del control de generaciones de semilla de arroz:

1. semilla madre - primer volumen de semilla obtenida de una variedad sembrada normalmente por el método de panoja por hilera. Son pequeñas parcelas, que darán origen a la siembra del semillero de básica.
2. semilla básica (B) - producida a partir de semilla madre.
3. semilla certificada 1 (C1) - producida a partir de semilla básica
4. semilla certificada 2 (C2) - producida a partir de semilla certificada 1
5. semilla comercial A - producida a partir de semilla certificada 2
6. semilla comercial B - sin control generacional, pero debe cumplir los estándares correspondientes de comercialización.

La semilla madre es sembrada usando el método de multiplicación de panoja por hilera con la semilla remitida por el mejorador. La semilla también puede provenir de panojas seleccionadas de esta misma categoría del año anterior. En este método se seleccionan panojas de plantas sanas y que cumplan con la descripción varietal de la especie, con las que se siembran pequeñas parcelas. Todas las

semillas provenientes de una panoja son sembradas en una hilera, y se realizan varias recorridas de observación en las distintas etapas de crecimiento del cultivo para identificar plantas atípicas. **Eliminar tempranamente las plantas atípicas es muy importante para evitar que a través del proceso de de-domesticación puedan dar origen a biotipos de AM.** En caso de identificarse alguna planta atípica, toda la hilera es eliminada, además de las dos hileras adyacentes a ambos lados. Este mecanismo asegura, además de la inexistencia de plantas atípicas, el control manual de cualquier maleza que haya escapado al control del herbicida, incluyendo el AM. Con la semilla proveniente de las panojas por hilera se siembra la semilla básica que dará origen a las siguientes multiplicaciones. Por el método y cuidados requeridos en la producción de esta semilla y su escala en cantidades mínimas, se obtiene la categoría más alta en pureza genética y física.

Las multiplicaciones de las sucesivas categorías se realizan siguiendo el estándar específico de arroz establecido por el INASE. Esta institución es quien se encarga de verificar el cumplimiento de los parámetros de campo y laboratorio exigidos.

En relación con los parámetros a nivel de campo que inciden favorablemente en el control de AM se encuentran la obligatoriedad del uso de rotaciones largas y la ausencia de panojas de esa maleza en la chacra. Se exigen seis años libres del cultivo de arroz en chacras para producción de semilla básica y C1 y cuatro años para semilla C2 y comercial.

Dos procedimientos son también fundamentales en la producción de semilla para evitar la presencia del AM:

- limpieza de maquinaria y herramientas: todos los implementos agrícolas utilizados en la producción de semillas deben estar correctamente limpios de forma de no contaminar nuevas áreas
- raleo manual: en las áreas de producción de semilla son realizadas varias recorridas por cuadrilla de operarios que van arrancando manualmente

plantas atípicas y plantas consideradas con tolerancia cero (AM, entre otras). Generalmente, cuanto más alta la categoría de semilla (básica), mayor cantidad de raleos son realizados.

El INASE realiza controles en la producción de la semilla básica y las categorías siguientes. Los técnicos realizan inspecciones en todas las etapas de producción de semilla para asegurar que se cumplan las normas establecidas. Por los estándares se exige al menos una inspección en la etapa de campo, pero lo habitual es que se realicen inspecciones en las etapas pre-siembra, siembra, floración y cosecha. En estas instancias se inspecciona el campo, la sembradora y cosechadora. Durante todas las etapas del procesamiento de la semilla también son realizadas inspecciones en la planta de semillas, lo que incluye secadores y máquinas de limpieza, clasificación y tratamiento de semillas. El objetivo de las inspecciones es asegurar, tanto en el campo como en la planta de procesamiento de semillas, la ausencia de plantas o semillas de otras especies, malezas y cultivares distintos al que se esté produciendo.

Todos los lotes de semilla producidos en el país de las diferentes categorías son muestreados por INASE para control de calidad en laboratorio y ensayos de postcontrol que es el último eslabón del proceso de certificación. Dentro de los parámetros de laboratorio definidos por INASE, el que incide directamente en el control del AM es el que define una tolerancia cero para las mismas, en todas las categorías de semillas. De esta forma se evita la comercialización de cualquier lote (volumen de hasta 30.000 kg) al que se le encuentre al menos una semilla de arroz maleza.

En general, es muy poco frecuente la presencia de AM en los lotes en certificación muestreados por INASE. Esto es debido a que, además de todos los cuidados ya mencionados durante la etapa de producción, los lotes en los que se detecta AM en los controles internos de calidad de las empresas son descartados como semilla y destinados a la industria.

RESULTADOS DE LA CREACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL PROGRAMA DE CERTIFICACIÓN DE SEMILLAS DE ARROZ

La creación del Programa de Certificación de Semillas de Arroz fue fundamental para el crecimiento del sector arrocero y la expansión del cultivo. El mismo inició la calificación de la semilla utilizada y el combate al AM que ya representaba un problema importante (FAO, 2007).

Con la creación de la Estación Experimental del Este (EEE) por el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP) en 1970, en el departamento de Treinta y Tres, se inició la certificación de semillas de arroz. El inicio de este proceso se da en el contexto de una situación comprometida de presencia de arroz maleza.

Según el informe publicado por FAO (2007), en Uruguay fueron cultivadas aproximadamente 26.800 ha de arroz en el año 1972. En ese momento, apenas 70% de la semilla utilizada por los productores era sometida a algún grado de procesamiento o limpieza. El 30% restantes era destinada a la utilización por los propios productores sin ningún tipo de procesamiento. En ese año fue realizado un estudio que reveló que el 38% de los lotes de semilla estaban contaminados con semillas de AM. La situación no era homogénea, pues el 90 % de los lotes de pequeños productores estaban contaminados, mientras que solo el 15 % de los lotes provenientes de grandes empresas arroceras estaban en la misma situación. Para ese año y según los resultados presentados por Jorge (1972) indican que el AM estaba presente en casi toda el área del cultivo de arroz. La falta de pureza varietal y la contaminación de esta maleza fue afectando no solamente la producción de arroz, sino también la calidad del producto. Esta situación hizo priorizar el desarrollo de un sistema que asegurara el abastecimiento de semillas de calidad y pureza varietal (FAO, 2007).

En la Figura 2 se presenta la evolución de la proporción de semilla de arroz

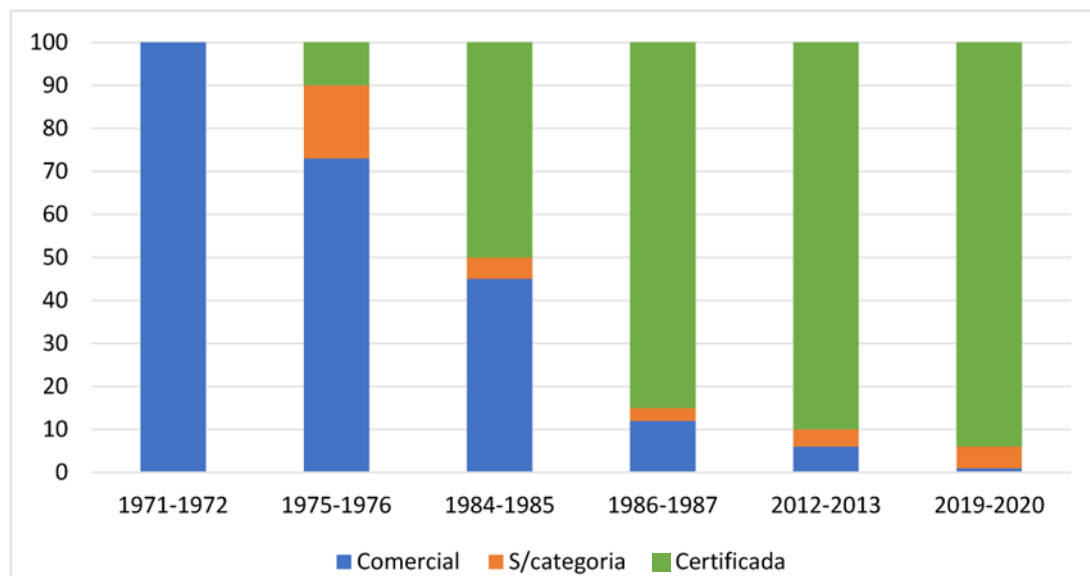


Figura 2. Evolución de la proporción de semilla de arroz certificada, comercial y sin categoría en Uruguay. Adaptado de Zorrilla y Jorge (1971 a 1987); Núñez (2012 a 2020).

certificada, comercial y sin categoría o de uso propio en diferentes zafras desde 1971-1972 hasta 2019-2020.

En la zafra 1984-1985, el cultivo de arroz ocupó un área de 80700 ha cultivadas, 48% de la misma fue cultivada con semilla certificada y la semilla comercial fue producida sobre estrictas reglamentaciones de control de calidad (Zorrilla y Acevedo, 1985). En ese año, los análisis de calidad de semilla mostraron que todos los lotes muestreados estaban libres de AM. El incremento en el uso de semilla certificada continuó hasta alcanzar más del 85% del área nacional cultivada en la zafra 1986-1987. En su informe, FAO (2007), afirma que el progreso realizado en establecer un sistema de calidad y el bajo uso de semilla propia por parte de los productores ha sido posible por el fuerte apoyo de la industria arrocera y su relación de cooperación con los productores de arroz.

En el año 1989 la Estación Experimental del Este pasa a formar parte del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), que tenía entre sus objetivos la producción de semilla básica de arroz.

Desde ese momento hasta la actualidad la adopción de semillas certificadas ha aumentado año a año llegando en la zafra 2019-2020 a un 94%.

SEMILLA IMPORTADA

La importación de semillas es muy variable cada año y representa una proporción muy baja del total de semilla utilizada en el país. En el año 2020 éste representó alrededor de 2% de la semilla total utilizada. El sector arrocero importa semilla de cultivares e híbridos con características de interés que no se encuentra en la genética nacional.

Sin embargo, hace algunos años comenzaron a detectarse lotes que entraban al país contaminados con AM. A partir de estos hechos, algunas empresas lograron la licencia de los cultivares de mayor interés para realizar la multiplicación de semillas en Uruguay con los respectivos controles del INASE.

LAS FORTALEZAS DEL SISTEMA EN EL USO Y ADOPCIÓN DE SEMILLAS CERTIFICADAS

Situación en la región

La tasa de utilización de semilla certificada para la siembra del cultivo de arroz en Uruguay es la mayor de la región. De todas formas, países vecinos han logrado aumentos importantes de

áreas sembradas con semillas certificadas.

Como ejemplo puede mencionarse el caso del estado de Río Grande del Sur en Brasil, principal productor de arroz de riego en el país, donde pasaron de un uso de 19% del área sembrada con semilla certificada en la zafra 2006-2007 a 58% en la zafra 2018-2019 (APASUL, 2019).

Además, se destacaron esfuerzos en aumentar la rigurosidad de la legislación para el comercio de semillas. Por la ley vigente en 1998 (Río Grande del Sur, 1998) se permitía la presencia de dos granos de AM común (rojo) en muestras de 500 g de semillas, representativas de un lote de semillas. Para el año 2013 esto fue modificado, siendo considerado el AM común y AM negro de tolerancia 0 en las muestras de 500 g para la semilla certificada y permitido 1 grano de AM común en categorías comerciales (MAPA, 2013).

Algunos trabajos realizados en ese estado muestran la importancia del origen de la semilla en la propagación del AM (Marchesan *et al.*, 2001; Bastiani *et al.*, 2013). De hecho, Agostinetto *et al.* (2001) definieron que la utilización de semillas contaminadas era el principal mecanismo de dispersión de AM en los cultivos de arroz en RS. Marchesan *et al.* (2001) analizaron la calidad de la semilla utilizada para la siembra de la zafra 1997-1998 para un 25% de los productores de Santa María, Brasil. Determinaron el origen de la semilla y cuantificaron la presencia de AM entre otros análisis. Los resultados indicaron que el 55% de los productores utilizaron semilla propia y solamente 10% utilizaron semilla certificada y/o básica. El 35% restante compró la semilla en comercios o vecinos que no informaron su procedencia. Apenas un 17% de las muestras no presentaron AM y casi la mitad de las muestras (47%) presentaron hasta dos semillas de AM por 500 g de semillas de arroz cultivado. Estas últimas fueron aptas para la comercialización por la legislación vigente. En promedio se encontraron 7,23 semillas de AM por muestra.

En un estudio donde se evaluó la calidad de lotes de semilla de arroz producida fuera

del sistema de certificación, provenientes de 13 regiones del estado de Río Grande del Sur en los años de 2006 a 2010 se evidenció la elevada incidencia de AM. En los diferentes años se encontró AM común entre un 70 y 100 % de los lotes y el AM negro varió entre 15,2 a 47,6 % de los lotes de semilla (Bastiani *et al.*, 2013).

En el estado de Santa Catarina, el uso de semillas certificadas es de un 75%, siendo el estado con la mayor tasa de utilización de semilla certificada en Brasil.

En Colombia para la zafra 2018-2019 la información recabada por el FLAR (2019), indica un uso de semilla certificada de un 48%.

Por otro lado, en Argentina no hay datos oficiales sobre el uso de semilla certificada para el cultivo de arroz, entretanto, Colazo *et al.* (com. pers.) utilizando información de INASE Argentina estimaron un porcentaje de uso de aproximadamente un 15%. Sin embargo, datos del FLAR (2019) estiman un uso bastante mayor, de aproximadamente 55%.

No cabe duda de que el uso de la semilla certificada de buena calidad es la primera medida para evitar la dispersión del arroz maleza y primera medida de control. Hay situaciones muy diversas en la adopción de semilla certificada entre los países y ésta se debe principalmente, entre otros factores, a la estrategia que cada uno de ellos ha desarrollado para fomentar el uso. Pueden mencionarse también las diferentes realidades en áreas, tecnologías de producción, así como la percepción de los productores de la importancia de adquirir semilla de buena calidad.

El éxito logrado en el caso de Uruguay demuestra la importancia de trabajar en conjunto con toda la cadena arrocera en el entendido que el beneficio de este trabajo repercute en todos los actores involucrados. Es importante destacar que, en los acuerdos logrados entre las partes, la semilla no es visualizada como un negocio en sí mismo, si no la forma de hacer llegar a todos los productores una semilla que garantice alcanzar el mejor producto final.

BIBLIOGRAFÍA

- Agostinetto, D.; Fleck, N.G.; Rizzardi M.A.; Merotto, A.; Vidal, R.A.** 2001. Arroz Vermelho: ecofisiologia e estratégias de controle. *Ciência Rural*, Santa Maria, v31, n2, p. 341-349. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000200026>
- Bastiani, J.; Andrade, F.; Cabrera, I.; Mertz, L.; Mattioni, N; Nunes, U.** 2013. Levantamento da qualidade de sementes de arroz irrigado produzidas fora do sistema de certificação. *Revista da FZVA, Uruguaiana*, v.19, n1, p. 10-19, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Instrução.** 2013. Normativa 45, de 17 de setembro de 2013. *Diário Oficial da União*, Brasília, nº 45 de 17 de setembro de 2013, p.1-22.
- Delouche, J.C.; Burgos, N.R.; Gealy, D.R.; Zorrilla, G.; Labrada, R.** 2007. Weedy rices – origin, biology, ecology and control. Seed shattering and dormancy in weedy rices.(cap. 4). Rome: FAO. p. 45-62. FAO Plant production and protection paper; 188)
- FLAR.** 2019. Encuesta de monitoreo y seguimiento al sector Arrocerero Latinoamericano (EMSAL). Observatorio del Arroz para América Latina.
- Marchesan, E.; Menezes, N.L. de.; Siqueira, C. do A.** 2001. Controle da qualidade das sementes de arroz irrigado utilizadas em Santa Maria/RS. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.31, n.3, p. 375-379. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000300002>
- Rio Grande do Sul. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Departamento de Produção Vegetal. CESP/RS.**1998. Normas e padrões de produção de sementes para o Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: SAA/DPV, 1998. 156 p.
- Tarán, C.** 2019. Orgullo celeste. La certificación de semilla de arroz. *Arroz (ACA)*, v.19, nº.98 p. 72-73.
- Zorrilla, G.; Acevedo, A.** 1985. Encuesta de semillas de arroz – año 1984. In: Resultados de la Experimentación Regional en Cultivos: Arroz – Soja, 1984 – 1985. Treinta y Tres: Estación Experimental del Este, CIAAB – MGA. p. 115-118.

4 - FLUJO GÉNICO DEL ARROZ CLEARFIELD® AL ARROZ MALEZA: ESTUDIO DE CASOS

J. E. Rosas¹, F. Pérez de Vida², V. Bonnacarrère³, N. E. Saldain⁴

PALABRAS CLAVE: arroz rojo, cruzamientos, resistencia a herbicidas

INTRODUCCIÓN

La pertenencia del arroz cultivado (AC) y arroz maleza (AM) a la misma especie (*Oryza sativa*, genoma A diploide) posibilita el flujo de genes entre ambos. A pesar del carácter principalmente autógamo del arroz dado por su anatomía floral y la breve viabilidad de su polen, los eventos de fecundación cruzada entre AC y AM ocurren a frecuencias que pueden ir de 0,05% a más del 30% (Chen *et al.*, 2004; Jia *et al.*, 2007). Un estudio de cruzamiento en condiciones experimentales entre las variedades Clearfield® (CL) CL161 y CL121 y AM de cáscara pajiza concluyó que al menos 170 plantas resistentes por hectárea se generarían en un solo ciclo de cultivo (Shivrain *et al.*, 2007). Por otra parte, las evaluaciones del riesgo de flujo de genes de resistencia en campos comerciales cultivados con cultivares CL en Luisiana, EE.UU., detectaron una tasa general del 0,17% (Zhang *et al.*, 2006). Existen diversos factores que afectan las tasas de cruzamiento. Los cultivares pueden presentar diferentes tasas, encontrándose 0,003% para CL121, y 0,008% para CL161, con un mismo tipo de AM (Shivrain *et al.*, 2007). El tipo de AM también puede determinar una variación en la tasa de cruzamiento, reportándose que el de cáscara negra presenta un rango hasta 10 veces mayor que el color paja (Shivrain

et al., 2010b). Estas variaciones se asocian principalmente a floraciones simultáneas del AC y el AM (Niruntrayakul *et al.*, 2009). Goulart *et al.* (2016) encontraron que las mutaciones de resistencia a imidazolinonas (IMI) en AM resistente cercano a cultivares CL, son siempre las mismas que la presente en dicho cultivar, sugiriendo que el principal mecanismo de aparición de resistencia es el flujo de genes. El flujo génico también fue reportado como la principal fuente de resistencia a IMI en AM en EEUU (Shivrain *et al.*, 2010a), Brasil (Roso *et al.*, 2010), e Italia (Scarabel *et al.*, 2012). El objetivo de este trabajo es evaluar la ocurrencia de flujo de genes de resistencia a IMI desde cultivos a AM en tres situaciones contrastantes de uso de la tecnología CL en Uruguay.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las accesiones de AM estudiadas provienen de tres chacras arroceras representando situaciones contrastantes de uso de la tecnología CL.

Caso I: chacra ubicada al norte del departamento de Cerro Largo, con cuatro sectores con 0, 1, 2 y 3 años de uso de CL (sectores A, B, C y D, respectivamente). El área total estudiada fue de aproximadamente 30 ha, con topografía y suelo homogéneos.

¹ Juan Rosas. Lic. M.Sc. Ph.D. INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz. jrosas@inia.org.uy

² Fernando Pérez de Vida. Ing. Agr. M.Sc. Ph.D. INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz. fperez@inia.org.uy

³ Victoria Bonnacarrère. Lic. Bioq. Ing. Agr. M.Sc. Ph.D. INIA. Unidad de Biotecnología. vbonnacarrere@inia.org.uy

⁴ Néstor Saldain. Ing. Agr. M.Sc. INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz (hasta junio 2021). nsaldain56@gmail.com

Tabla 1. Detalle de características de cada sector estudiado en el Caso I.

Sector	Superficie (ha)	Año	Aplicaciones de herbicida	Cultivar	Mutación de resistencia a IMI
A	4	1	0	INIA Olimar	Ninguna
		2	0	INIA Olimar	Ninguna
		3	0	INIA Olimar	Ninguna
B	8	1	0	INIA Olimar	Ninguna
		2	0	INIA Olimar	Ninguna
		3	2	INTA Puitá-CL	Ala ₁₂₂ Thr
C	9	1	0	INIA Olimar	Ninguna
		2	1	INTA Puitá-CL	Ala ₁₂₂ Thr
		3	2	INTA Puitá-CL	Ala ₁₂₂ Thr
D	8	1	1	CL161	Ser ₆₅₃ Asp
		2	1	CL161+INTA Puitá-CL	Ser ₆₅₃ Asp-Ala ₁₂₂ Thr
		3	2	INTA Puitá-CL	Ala ₁₂₂ Thr

Los cultivares sembrados en cada sector y año, y sus mutaciones de resistencia a IMI se detallan en el cuadro 1.

Caso II: establecimiento en el ex Espinillar, Salto, sin historia previa de uso de CL, en el que se relevaron en la zafra 2007-2008 tres sectores (E, F, y G) con cultivo de la variedad convencional El Paso 144. Las áreas E y F tuvieron en la zafra 2006-2007 híbrido CL de RiceTec, con mutación Ser₆₅₃ Asp, e INTA Puitá CL con mutación Ala₁₂₂ Thr, respectivamente, mientras que en el área G se cultivó El Paso 144. El total del área muestreada en este caso fue de aproximadamente 40 ha.

Caso III: chacra en departamento de Treinta y Tres, con un único cultivo de CL161 en la zafra 2005-2006 y barbecho con laboreo de verano en zafra 2006-2007, para posterior implantación de un cultivo con la variedad convencional El Paso 144 en la zafra 2007-2008, momento en que se realizó el muestreo de AM. Se relevó un área aproximada de 10 ha.

Muestras

En los tres casos los muestreos se realizaron en la zafra 2007-2008, georeferenciándose puntos y colectándose

plantas en 142 puntos en el Caso I, 75 puntos en el Caso II, y 50 puntos en el Caso III. En el Caso I los puntos se ubicaron 24 en el sector A (101 plantas), 29 en el sector B (74 plantas), 31 en el sector C (75 plantas), y 48 en el sector D (90 plantas). En el caso II se muestrearon 25 puntos en las áreas E, F y G. En los casos II y III la colecta de semillas se realizó en forma masal, mientras que en el caso I se cosechó una panoja de cada planta madre, manteniéndose las progenies identificadas y separadas.

La colecta de semillas se realizó en 4 instancias debido a la diversidad de tiempos de maduración en una misma planta madre, y entre distintas plantas. Se colocaron bolsas de papel cubriendo cada panoja a muestrear para evitar la pérdida de semillas por desgrane precoz (Figura 1).

Aplicación de herbicida

Se realizó una primera selección de plantas de AM por sobrevivencia a dosis letales de herbicida. Se sembró la semilla colectada en almacigueras conducidas en invernáculo. Por cada planta madre de AM se sembró la semilla de una panícula (aprox. 40 semillas) en una hilera de almaciguera, así como hileras con variedades testigo

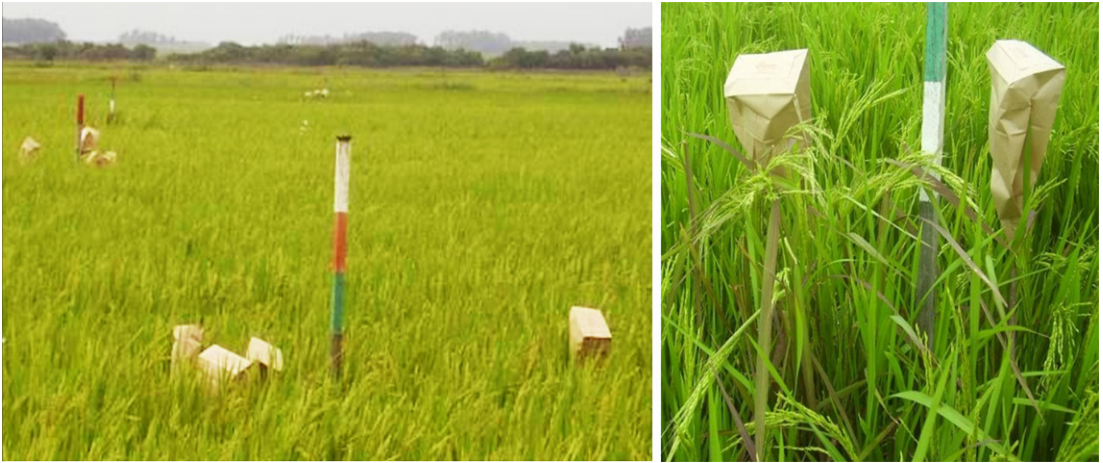


Figura 1. Marcación de puntos y protección de la semilla para su colecta.

susceptible (INIA Olimar) y resistente (INTA Puitá CL) en cada almaciguera. Se realizaron dos aplicaciones secuenciales de herbicida Ki+Fix®, BASF (imazapic 17,5% p/p, imazapir 52,50% p/p + coadyuvante tensioactivo no iónico Plurafac® al 0,25%) a dosis letales (200 g/ha), a los 15 y 30 días postemergencia. Se conservaron a -20 °C muestras de tejido de una planta por cada hilera con más de 50% de sobrevivientes.

Detección molecular de mutaciones de resistencia

Para las plantas colectadas en el caso I, de cada planta madre cuya progenie tuviera más del 50% de plantas sobrevivientes se analizó un individuo sobre-

viviente por técnicas moleculares, para determinar la presencia de mutaciones de resistencia. Se aisló ADN con el método CTAB, y se detectó la presencia de las mutaciones Ser₆₅₃Asp y Ala₁₂₂Thr con el método KASP (Rosas *et al.*, 2014). Todas las plantas sobrevivientes a herbicida de los casos II y III fueron analizadas por estos marcadores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caso I. Durante la identificación de puntos con presencia de AM, se observaron diferencias en la densidad de plantas y de puntos en los distintos sectores, que fueron confirmadas por los datos de GPS. Los puntos del sector A que no



Figura 2. Ejemplos de variabilidad fenotípica observada en AM de sectores C y D, indicadora de poblaciones segregantes. Se observa en hojas y tallos pigmentación purpúrea sugestiva de hibridación con la variedad CL161 dado que tiene la base de la vaina con esa coloración.

habían recibido tratamiento de herbicidas IMI, tendían a ser de mayor diámetro y con mayor cantidad de plantas, mientras que los sectores con más años de uso presentaban puntos con menos plantas. En cuanto a las características fenotípicas de los AM identificados, se observó una mayor diversidad en

los sectores C y D, encontrándose en este último gran variabilidad en la altura, color de hojas, forma y color de grano, presencia de arista, macollaje y pilosidad en hojas. Asimismo, se observó pigmentación en distintos tonos de púrpura en tallos y hojas de algunas plantas (Figura 2)

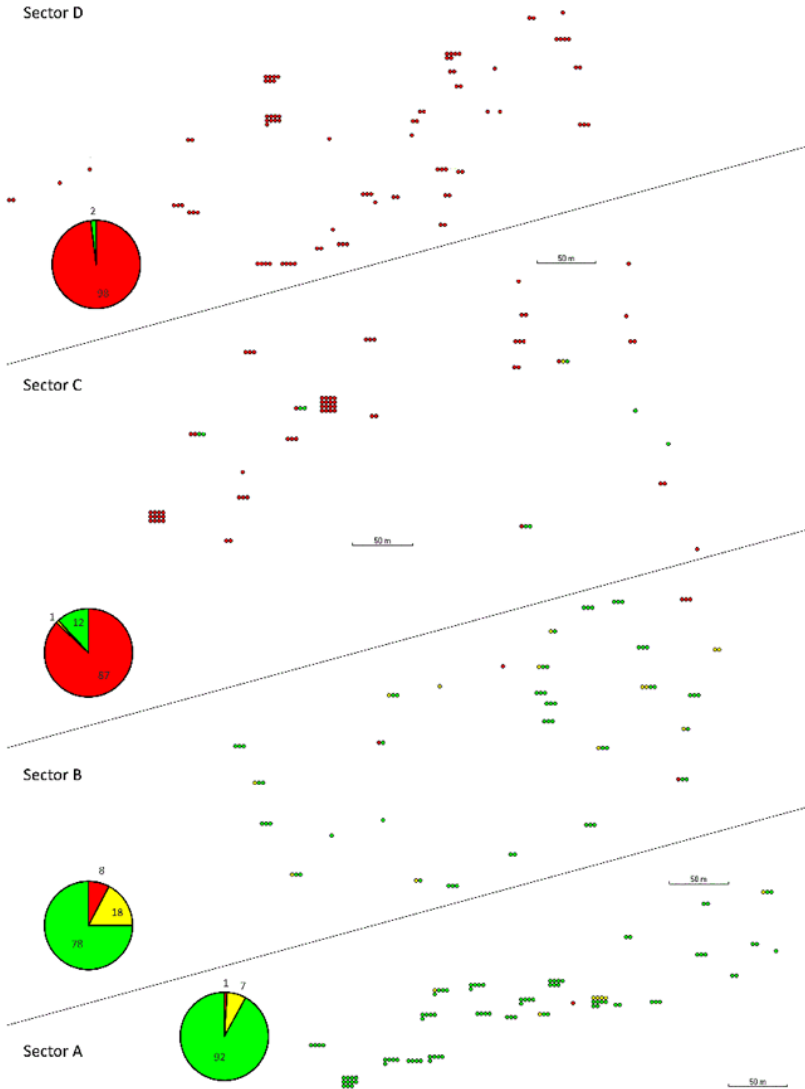


Figura 3. Distribución espacial de puntos muestreados y resultados de la aplicación de imidazolinonas en plantas de AM colectadas de los cuatro sectores del Caso I: sin uso de CL (A), con 1 año de uso (B), 2 años (C) y 3 años (D). Cada punto corresponde a un agrupamiento de individuos de AM (de 1 a 16, promedio 3,1). La progenie de cada individuo fue sometida a dosis letales de imidazolinonas. El color verde corresponde a una progenie totalmente susceptible (0 sobrevivientes); el amarillo a <10% de plantas sobrevivientes; y el rojo a más del 50% de la progenie. De cada una de las progenies con más de 50% de sobrevivientes se tomó un individuo para determinar la presencia de las mutaciones de resistencia Ala₁₂₂Thr y Ser₆₅₃Asp por métodos moleculares. Los gráficos circulares muestran el porcentaje de puntos muestreados con cada tipo de progenie.

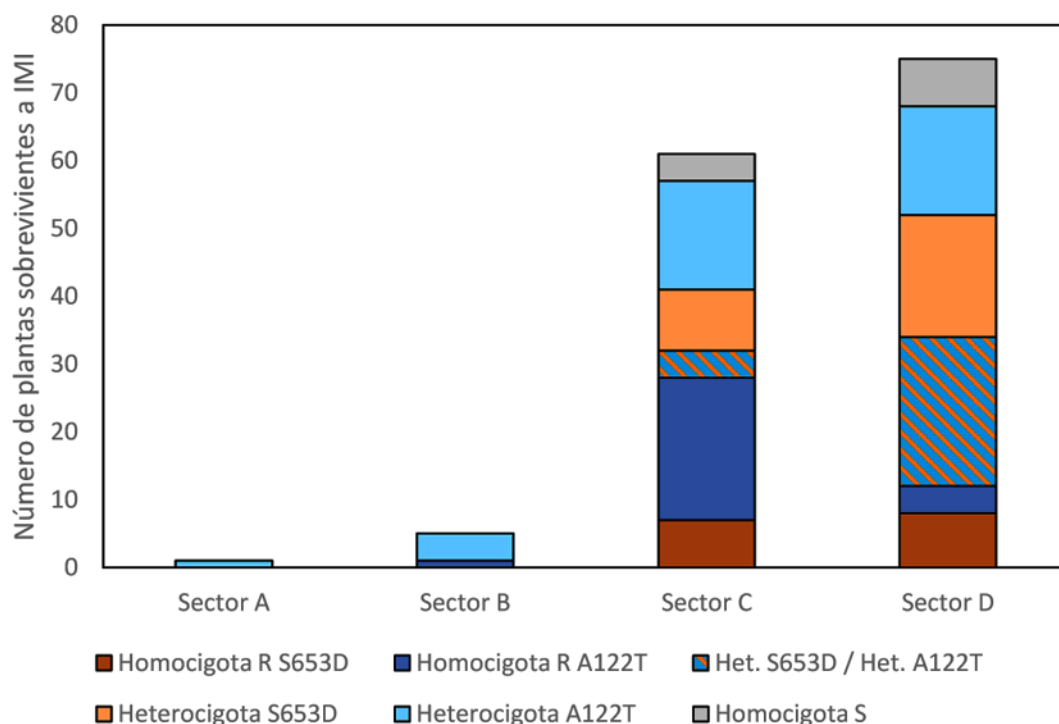


Figura 4. Resultados del análisis molecular de plantas seleccionadas de progenies con más del 50% de sobrevivientes tras la aplicación de dosis letales de imidazolinonas, en los cuatro sectores del Caso I: Sector A sin uso de CL; Sector B 1 año de uso; Sector C 2 años; Sector D 3 años.

En la Figura 3 se muestra la distribución espacial de las plantas madre clasificadas de acuerdo con el porcentaje de plántulas sobrevivientes a la aplicación de herbicida en sus progenies, y su proporción en cada sector. Puede observarse la absoluta predominancia de plantas cuyas progenies fueron susceptibles a IMI en el sector A, y el progresivo aumento de plantas con progenies resistentes al herbicida a medida que se intensifica el uso del arroz CL. Los dos únicos puntos con plantas resistentes en el sector B se ubican a pocos metros del sector C, mientras que el único punto con plantas resistentes del sector A se encuentra a más de 300 m de los sectores con uso de CL.

El análisis por marcadores moleculares de las plantas sobrevivientes a IMI (Figura 4) mostró la ocurrencia de al menos dos eventos de flujo génico desde los cultivares CL al AM, ya que fueron detectadas tanto la mutación Ala₁₂₂Thr proveniente de la variedad INTA Puitá CL, como la

Ser₆₅₃Asp proveniente de CL161. Asimismo, la presencia de plantas heterocigotas combinando ambas mutaciones implican un tercer evento de cruzamiento, probablemente entre plantas heterocigotas para Ser₆₅₃Asp, con el cultivar INTA Puitá CL. Este evento puede haber ocurrido en el sector D y luego propagarse hacia el B, o en ambos sectores en forma independiente. También se observó un impacto importante de la dispersión de semilla en la dinámica de la población del AM resistente a IMI, con dos plantas homocigotas para el alelo Ala₁₂₂Thr en el sector B. Por ser un sector con sólo un año de uso de CL, no podrían haber ocurrido allí las dos generaciones necesarias para la obtención de individuos homocigotas. Por lo tanto, es muy probable que estas plantas sean producto de la dispersión de semilla desde el sector D.

Caso II. De los 75 puntos muestreados, solamente en tres se encontraron progenies sobrevivientes a la aplicación de dosis letales de IMI, dos de ellas

provenientes del sector E, y una del sector F. Las plantas sobrevivientes al herbicida fueron homocigotas resistentes para la mutación Ser₆₅₃Asp. Considerando que la chacra no tenía historia previa de cultivos resistentes a IMI, el origen de las plantas homocigotas resistentes podría atribuirse a dispersión de semilla de AM resistente a través de maquinaria u otros medios, y/o al uso de semilla contaminada.

Caso III. En esta situación no se encontraron sobrevivientes a la aplicación de IMI en dosis recomendadas, en ninguna de las progenies de los 50 puntos estudiados. Este caso de mínima intensidad con un único año de uso de CL implica menos oportunidades de ocurrencia de cruzamientos, así como una baja presión de selección que pudiera haber favorecido la predominancia de individuos naturalmente resistentes que estuvieran presentes en muy baja frecuencia en el banco de semillas del suelo. Sin embargo, la ocurrencia de semillas de AM susceptible a IMI en el banco de suelo mantuvo la presencia de esta maleza en la zafra de muestreo, a pesar del uso de laboreos de verano para el control por mecanismos físicos de la maleza en la zafra 2006-2007.

CONCLUSIONES

En general se observa una relación entre la intensidad de uso de CL y la abundancia de AM resistente a IMI. Esto es particularmente claro en el Caso I, donde la proporción de plantas de AM resistente a IMI aumenta exponencialmente con los años de uso de CL. El Caso II es un ejemplo de la importancia que tienen los mecanismos de arrastre o traslado de semilla de maleza, probablemente mediante la maquinaria de cosecha, en la dispersión de las malezas resistentes. Por último, el Caso III muestra que en condiciones de baja intensidad de uso de CL y sin que haya presión de selección por el uso reiterado del mismo principio activo, no se genera AM resistente en cantidades detectables.

BIBLIOGRAFÍA

- Chen LJ; Lee, DS; Song, ZP, Suh, H.S.; Lu, B.R.** 2004. Gene Flow from Cultivated Rice (*Oryza sativa*) to its Weedy and Wild Relatives. *Annals of Botany* 93:67–73. <https://doi.org/10.1093/aob/mch006>
- Goulart, I. C. G. R.; Menezes, V. G.; Bortoly, E. D.; Kupas, V.; Merotto, A.** 2016. Detecting gene flow from ALS-resistant hybrid and inbred rice to weedy rice using single plant pollen donors. *Experimental Agriculture* 52(2):237–250. <https://doi.org/10.1017/S0014479715000058>
- Jia, S.; Wang, F.; Shi, L.; Yuan, Q.; Liu, W.; Liao, Y.; Li, S. Jin, W. Peng, H.** 2007. Transgene flow to hybrid rice and its male-sterile lines. *Transgenic Research* 16:491–501. <https://doi.org/10.1007/s11248-006-9037-z>
- Niruntrayakul, S.; Rerkasem, B.; Jamjod, S.** 2009. Crossability between cultivated rice (*Oryza sativa*) and common wild rice (*O. rufipogon*) and characterization of F1 and F2 populations. *ScienceAsia* 35:161–169. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2009.35.161>
- Roso, A.C. Merotto Jr. A.; Delatorre C.A, Menezes V.G.** 2010. Regional scale distribution of imidazolinone herbicide-resistant alleles in red rice (*Oryza sativa* L.) determined through SNP markers. *Field Crops Research* 119:175–182. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.006>
- Scarabel, L.; Cenghialta, C.; Manuello, D.; Sattin, M.** 2012. Monitoring and Management of Imidazolinone-Resistant Red Rice (*Oryza sativa* L., var. *sylvatica*) in Clearfield® Italian Paddy Rice. *Agronomy* 2:371–383. <https://doi.org/10.3390/agronomy2040371>
- Shivrain, V.K.; Burgos, N.R.; Anders, M.M. Rajguru, S.N.; Moore, J.; Sales, M.A.** 2007. Gene flow between Clearfield™ rice and red rice. *Crop Protection* 26(3):349–356. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2005.09.019>
- Shivrain, V.K.; Burgos, N.R.; Sales, M.A.; Kuk, Y.I.** 2010a. Polymorphisms in the ALS gene of weedy rice (*Oryza sativa* L.) accessions with differential tolerance to imazethapyr. *Crop Protection* 29:336–341. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.10.002>

- Shivrain, V.K.; Burgos, N.R.; Scott, R.C.; Gbur Jr., E.E.; Estorninos Jr., L.E.; McClelland, M.R.** 2010b. Diversity of weedy red rice (*Oryza sativa* L.) in Arkansas, U.S.A. in relation to weed management. *Crop Protection* 29(7):721–730. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.02.010>
- Zhang, W.; Linscombe, S.D.; Webster, E.; Tan, S.; Oard, J.** 2006. Risk assessment of the transfer of imazethapyr herbicide tolerance from Clearfield rice to red rice (*Oryza sativa*). *Euphytica* 152:75–86. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9180-x>

5 - MONITOREO DE MUTACIONES DE RESISTENCIA A IMIDAZOLINONAS EN ARROZ MALEZA

J. E. Rosas¹

PALABRAS CLAVE: marcadores moleculares, resistencia, Sistema Clearfield®

INTRODUCCIÓN

Como se discutió en capítulos anteriores, el arroz maleza (AM) está considerado como una de las malezas más problemáticas del cultivo de arroz en Uruguay y en el mundo, por la dificultad que presenta su control y la potencialidad de dejar fuera del sistema a chacras con infestación severa (Delouche *et al.*, 2007). La tecnología de arroz resistente a imidazolinonas (IMI) utilizada por ejemplo en Sistema Clearfield® (CL, BASF) o en el Full Page (FP, RiceTec) consiste en cultivares no transgénicos resistentes a estos herbicidas de acción total y amplio espectro, y es la herramienta más extendida para el control químico selectivo en el cultivo. La resistencia a IMI de los cultivares CL y FP está dada por mutaciones o polimorfismos de un solo nucleótido (SNP) en el gen que codifica para el sitio de acción de estos herbicidas, la enzima aceto lactato sintasa (ALS, también llamada aceto hidroxilácido sintasa, AHAS, EC 2.2.1.6). Existen tres mutaciones de resistencia a IMI presentes en cultivares CL reportadas a la fecha (Rosas *et al.*, 2014). Las tres consisten en sustituciones de una guanina (G) por una adenosina (A) en las posiciones 1886, 1883 y 336 de la secuencia nucleotídica del gen ALS, y determinan cambios de los aminoácidos glicina por glutámico (Gly₆₅₄Glu), serina por aspartato (Ser₆₅₃Asp), y alanina por treonina (Ala₁₂₂Thr), respectivamente. Las mutaciones Gly₆₅₄Glu y Ser₆₅₃Asp fueron

obtenidas por la Universidad Estatal de Luisiana (EE.UU.) sometiendo a mutagénesis química a líneas y cultivares de tipo *japónica* tropical (Croughan, 1998), mientras que la mutación Ala₁₂₂Thr fue obtenida por el mismo método en INTA Concepción del Uruguay (Argentina) en líneas de tipo *indica* (Livore *et al.*, 2007). En nuestro país la tecnología CL comenzó a utilizarse en arroz en 2004, existiendo a partir de ese entonces la disponibilidad de diversos cultivares con resistencia a IMI. Las variedades desarrolladas por INTA como Puitá CL, Gurí CL y Memby Porá CL y el híbrido de RiceTec Titán CL poseen la mutación Ala₁₂₂Thr, mientras que las variedades de INIA como CL212, CL244, y el híbrido de RiceTec Inov CL, poseen la mutación Ser₆₅₃Asp (Rosas *et al.*, 2014). La mutación Gly₆₅₄Glu está presente en la variedad IRGA 422CL, sembrada en la década pasada en Río Grande del Sur, Brasil.

Como se expone en capítulos anteriores, es posible la fecundación cruzada entre el arroz cultivado y el AM, dado que ambos pertenecen a la misma especie (Shivrain *et al.*, 2009). Esto genera híbridos resistentes al herbicida que comprometen fuertemente la eficacia de su control químico (Flow *et al.*, 2003). Las recomendaciones de uso de la tecnología CL en arroz buscan minimizar la ocurrencia de cruzamientos entre plantas de AM y el cultivo CL, que puedan dar origen a AM resistente a IMI. Para ello se enfatiza en el uso de fórmulas, dosis y modo de aplicación adecuados que permitan el mayor

¹Juan Rosas. Lic. M.Sc. Dr. Cs. Agrarias, INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz. jrosas@inia.org.uy

control posible de la maleza y la realización de raleo manual (roguing) o aplicación localizada de herbicida con barra pulverizadora en los escapes de AM (BASF, 2016). Sin embargo, a pesar de estas recomendaciones se ha documentado la presencia de AM con mutaciones de resistencia a IMI en la mayoría de los países donde se cultiva arroz CL (Dauer *et al.*, 2018; Merotto *et al.*, 2016), incluyendo Uruguay (Rosas *et al.*, 2013). Por ese motivo, se ha recomendado que el uso de la tecnología CL se acompañe del monitoreo de las poblaciones de AM para la identificación y control en forma temprana de AM con mutaciones de resistencia a IMI y para identificar los factores que afectan la aparición de esta resistencia (Scarabel *et al.*, 2012). Uruguay fue pionero en ese monitoreo mediante el Servicio de Detección de Resistencia a Imidazolinonas en AM (SDRI) brindado por INIA desde la zafra 2011-2012. El servicio se ofrece a usuarios del sistema Clearfield® y consiste en analizar plantas de AM provenientes de chacras con historia de uso de tecnología CL, para determinar si estas poseen alguna de las mutaciones de resistencia a IMI mencionadas anteriormente. Para su puesta en funcionamiento se contó con el apoyo de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII, PR_SCT_2010_14). Actualmente es cofinanciado por BASF e INIA. Con el fin de apoyar las recomendaciones de uso de la tecnología en evidencia y datos locales, las muestras a analizar deben acompañarse de información sobre la intensidad de uso de CL en la chacra de la que provienen. Para mantener la confidencialidad de los resultados esta información no identifica usuarios, sino que se utiliza únicamente con fines estadísticos.

Este trabajo presenta la información generada durante ocho años de funcionamiento del SDRI, analizándola con tres objetivos: 1) estimar la probabilidad de resistencia por cruzamientos entre AM y cultivares CL en función de los años de uso de CL y su evolución durante el período analizado; 2) estudiar la presencia de plantas de AM resistentes en chacras en las que no hubo oportunidad de cruzamientos entre AM y el cultivo CL y 3)

evaluar la dinámica del AM resistente cuando no hay selección por herbicida.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras analizadas en el SDRI y conjuntos de datos para análisis estadísticos

Las 549 plantas de AM analizadas en este trabajo fueron recibidas por el SDRI desde 2011-2012 a 2019-2020. Proviene de 78 chacras, con una media de 7, mínimo de 1 y un máximo de 66 plantas por chacra. Las chacras tuvieron un rango de entre 0 a 9 años de uso de CL (media 2 años, y se ubicaron en los departamentos de Artigas (30), Salto (5), Tacuarembó (2), Cerro Largo (27), Treinta y Tres (7) y Rocha (7). Las muestras fueron colectadas por los usuarios del servicio a inicio de floración, posteriormente a las aplicaciones de IMI y con identificación fenotípica de la planta como AM, georreferenciándose con GPS el punto de ubicación de las plantas muestreadas. Por cada planta a analizar, un fragmento de hoja nueva de unos 5 cm de largo se colocó en un tubo Falcon de 50 ml conteniendo 15 ml de sílica gel para conservación del tejido. Las muestras se enviaron al Laboratorio de Biotecnología de INIA Treinta y Tres para su análisis molecular.

Análisis molecular

Se extrajo el ADN a partir de tejido de cada planta colectada, mediante una modificación del método del CTAB (Dellaporta *et al.*, 1983). Brevemente, en un tubo de 1,2 ml se colocan 0,1 g de tejido y una bolita de acero de 3,97 mm de diámetro, agitándose intensamente por 1 minuto. Se agregan 500 µl de CTAB al 10% con 0,2% de b-mercaptoetanol y se incuba por 20 minutos a 65°C agitando cada 5 minutos. Se agregan 500 µl de cloroformo:alcohol isoamílico 24:1 v/v y se mezcla por inversión. Se centrifugan los tubos por 20 minutos a 2100 g. La fase acuosa se transfiere a un nuevo tubo y se agregan 300 µl de isopropanol frío. Se incuba por 30 minutos a 4 °C, centrifugándose

a 2100 g por 5 minutos. Se realizan tres lavados con etanol al 70%, tras lo cual el ADN aislado se resuspende en 100 μ l de agua bidestilada estéril. Se ajusta la concentración de ADN a 100 ng/ μ l.

Las mutaciones Ala₁₂₂Thr, Ser₆₅₃Asp y Gly₆₅₄Glu fueron detectados con el método «Kompetitive Allele-Specific PCR» (KASP, LGC Genomics) con la reacción descrita en Rosas *et al.* (2014). El genotipado por KASP permite la amplificación y detección en un único paso y en el mismo tubo, mediante la emisión de fluorescencia a una longitud de onda específica para cada uno de los dos alelos posibles en el locus analizado. La amplificación y detección por KASP se realizó en un termociclador PikoReal 96 PCR System (Thermo Scientific).

Análisis estadístico

Conjuntos de datos

Para los análisis estadísticos se dividieron los datos totales (n=549) en tres grupos, que se corresponden con los tres objetivos de este trabajo: grupo de datos 1, únicamente con datos de las plantas provenientes de chacras con cultivo CL en el momento de colecta y descartando las plantas resistentes que no pudieron originarse por cruzamientos ocurridos en la chacra muestreada (n=383); grupo de datos 2, con datos de plantas provenientes de chacras con menos de dos años de uso de CL en el momento de la colecta (n=116) y grupo de datos 3, con datos de plantas provenientes de chacras en las que no había CL en el momento de la colecta (n=115).

Modelos

Se ajustaron tres modelos de regresión logística ordinal, todos con el resultado del genotipado por KASP como variable de respuesta, codificado como 0 para homocigota susceptible (ausencia de mutación), 1 para heterocigota (mutación segregante) y 2 para homocigota resistente (mutación fijada). Para el objetivo 1 se estimaron los efectos de la intensidad de uso de CL, codificada como 1 (1 año de uso de CL), 2 (2

años de uso de CL) y 3 (3 o más años de uso de CL), del año en el que se colectaron las muestras como variable cuantitativa con valores de 2012 a 2019, y de la interacción entre ambas, en el grupo de datos 1.

Para el objetivo 2 se estimaron los efectos del departamento de origen de la muestra (Artigas, Cerro Largo, Rocha, Salto, Tacuarembó, o Treinta y Tres), de la mutación identificada (Ala₁₂₂Thr, Ser₆₅₃Asp, o Gly₆₅₄Glu), del tipo de cultivar (variedad o híbrido) y el tipo de antecesor más frecuente (arroz convencional, otros cultivos de verano, descanso), utilizando el grupo de datos 2.

Para el objetivo 3, por un lado y utilizando el grupo de datos 3, se estimó el efecto de la cantidad de años sin uso de CL inmediatamente anteriores al muestreo (de 1 a 4). Por otra parte y utilizando el total de los datos, se estimó el efecto de muestrear plantas de AM en chacras en las que en la zafra de colecta no se aplicaron IMI.

Los análisis se implementaron con el software estadístico R usando los paquetes *MASS*, *lme4*, *car*, y *effects*.

RESULTADOS

Se encontraron efectos significativos ($P < 0,05$) de la intensidad de uso de CL, de la zafra en la que se realizó la colecta y de la interacción entre ambas, sobre el nivel de resistencia encontrado en las plantas de AM analizadas. La figura 1 muestra las probabilidades de que las plantas muestreadas no tengan mutaciones de resistencia (homocigotas susceptibles), o tengan una copia del gen resistente (resistentes heterocigotas) o ambas copias (resistentes homocigotas). Con una intensidad de uso de CL baja (menos de 2 años), las probabilidades de tener plantas de AM resistentes se mantuvieron entre 23% y 24% durante el período analizado de 2012 a 2019. Sin embargo, en ese mismo período estas probabilidades pasaron de 34% a 54% en chacras con intensidad de uso de CL intermedia (2 años) y de 48% a 82% en chacras con intensidad de uso de CL alta (más de 2 años).

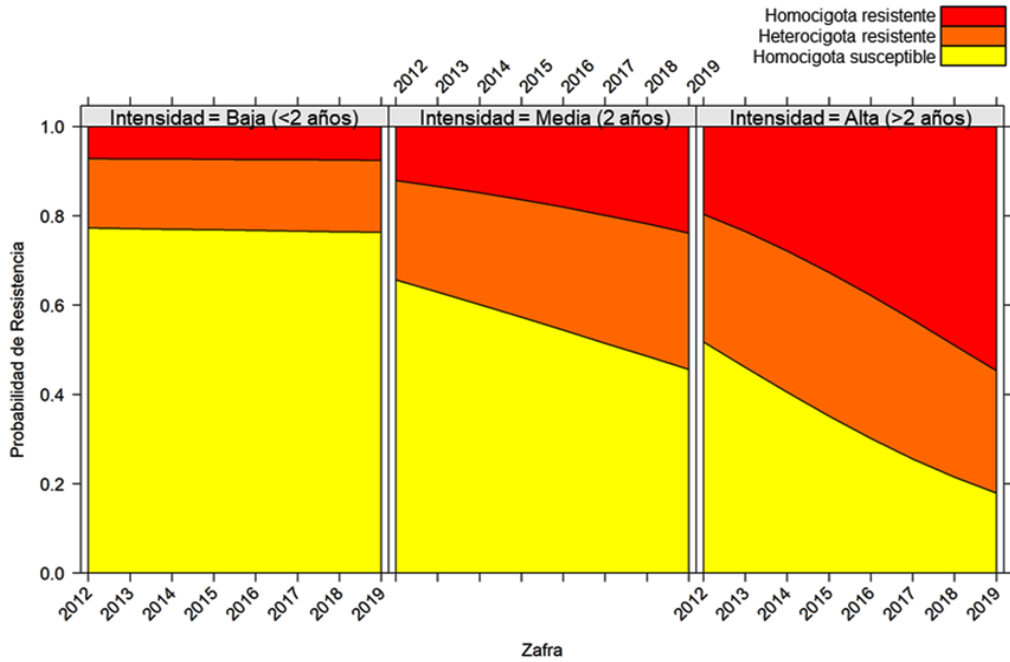


Figura 1. Evolución de la probabilidad de resistencia en plantas de AM a lo largo de las últimas 8 zafras en chacras con intensidad de uso de CL baja (menor a 2 años), media (2 años) y alta (más de 2 años).

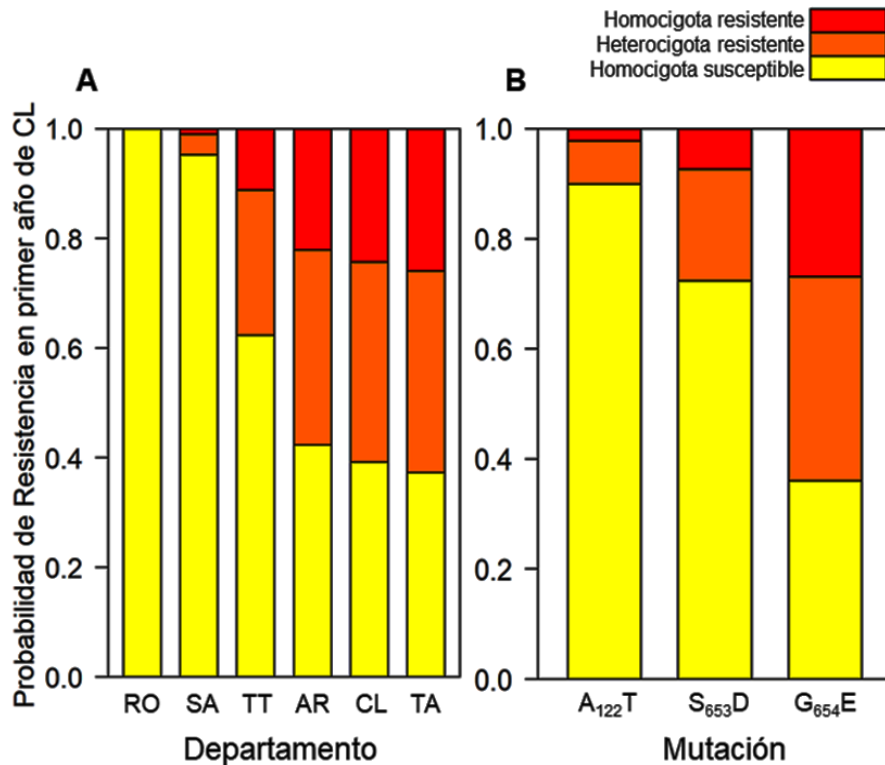


Figura 2. Probabilidades de resistencia en plantas de AM colectadas al primer año de uso de CL, A) por Departamento AR: Artigas (n=51), CL: Cerro Largo (n=28), RO: Rocha (n=7), SA: Salto (n=5), TA: Tacuarembó (n=4), TT: Treinta y Tres (n=21); B) por mutación identificada Ala₁₂₂ Thr (A₁₂₂T, n=36), Ser₆₅₃ Asp (S₆₅₃D, n=71), Gly₆₅₄ Glu (G₆₅₄E, n=9).

En cuanto a la presencia de AM resistente colectado de chacras con menos de dos años de uso de CL, es decir, que no pudo haberse originado por cruzamientos ocurridos en la chacra muestreada, se encontró un efecto significativo del departamento donde se obtuvo la muestra y de la mutación identificada. No fueron significativos los efectos de tipo de cultivar (variedad o híbrido) ni de tipo de antecesor más frecuente (arroz convencional, otros cultivos de verano, descanso). La figura 2 muestra las probabilidades de encontrar plantas sin mutaciones de resistencia, o heterocigotas y homocigotas resistentes. Se encontraron probabilidades bajas de este tipo de resistencias en los departamentos de Rocha y Salto, intermedias en Treinta y Tres (40%) y altas (rondando el 60%) en Artigas, Cerro Largo y Tacuarembó (Figura 2 A). Asimismo, la mutación Gly₆₅₄Glu se encontró con mayor proporción que las demás en chacras con menos de dos años de uso de CL (Figura 2 B).

Finalmente, en lo que respecta a la dinámica de la población de AM resistente cuando no hay presión de selección por aplicación de IMIS no se encontró un efecto significativo de la cantidad de años desde el último uso de CL en la probabilidad de encontrar plantas de AM resistentes. Sin embargo, la probabilidad de encontrar plantas resistentes en chacras donde no se aplicó IMI previamente al muestreo fue significativamente menor (24%, con IC al 95% de 17 a 33%) que en aquellas donde sí hubo selección por herbicida (56%, con IC al 95% de 51 a 61%), independientemente de los demás factores de manejo e historia de la chacra.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La probabilidad de resistencia por cruzamientos entre AM y cultivares CL aumenta con la intensidad de uso de CL, y lo hace en forma cada vez más rápida. Si bien cuando la intensidad de uso de CL es baja (menos de dos años) la probabilidad de tener plantas de AM resistentes se ha mantenido igual en los últimos ocho años, sí hubo un

aumento importante en chacras con dos o más años de uso de CL. La evidencia recogida en estas ocho zafas de monitoreo de poblaciones de AM en chacras con uso de CL permite concluir que durante este período hubo un aumento del riesgo de resistencia en AM después del primer año de uso de CL. En otras palabras, el riesgo de tener AM resistente que anteriormente se asociaba a 3 o más años de uso de CL, hoy se tiene ya en el segundo año de CL. Una posible explicación a este fenómeno sería la creciente acumulación de alelos de resistencia en la población de arroz maleza, que haría cada vez más probable que una planta o semilla al azar posea dichos alelos. Serían necesarias más investigaciones para evaluar esta hipótesis, así como para confirmar si esta tendencia ocurre en forma general en todas las chacras con CL del país, o se limita a las de mayor intensidad que hacen uso del servicio.

Se comprobó también la presencia de AM resistente en chacras con menos de dos años de uso de CL. Estos hallazgos pueden explicarse o bien por un subregistro de la verdadera intensidad de uso de CL en la chacra muestreada, o bien por el origen de este AM resistente en forma externa a la chacra muestreada, y que llega a ella mediante el uso de semilla contaminada, o por arrastre o difusión por otros medios (maquinaria, cursos de agua y riego, animales, etc.). Estos hallazgos tienen una distribución geográfica bastante definida, estando asociados a localizaciones donde la ocurrencia de algunos de estos factores puede ser más frecuente. Se destaca también la presencia en proporciones significativas en AM resistentes encontrados en chacras con primer año de uso de CL, de la mutación de primera generación Gly₆₅₄Glu, ausente en los cultivares CL registrados en nuestro país, pero ampliamente difundida en los AM resistentes a IMI del estado de Río Grande del Sur (Roso *et al.*, 2010).

La resistencia en AM proveniente de chacras que no tenían cultivo CL en el momento del muestreo no estuvo asociada a la cantidad de años transcurridos desde el último cultivo CL, lo que sugiere que la

semilla de AM resistente se mantiene en el banco de semillas del suelo en forma similar a lo que ocurre con el AM susceptible. En otras palabras, la introgresión del gen de resistencia desde el cultivo CL no afecta significativamente la sobrevivencia de la maleza por varios años. En lo que hace a decisiones de manejo, esto puede ser interpretado como que una vez que se genera AM resistente en una chacra y éste logra producir semilla, ésta se mantendrá en la chacra por varios años, aún sin la presión de selección por uso de CL.

Finalmente, la observación de que es menos probable encontrar plantas resistentes en chacras en las que no se aplicó herbicida previo al muestreo, hace recomendable que los muestreos para monitorear la presencia de AM resistente se hagan preferentemente en chacras con uso de CL en el momento del muestreo.

En resumen, este trabajo presenta nueva evidencia que refuerza reportes previos de cruzamientos de AM con cultivo CL y que estos cruzamientos se incrementan con la intensidad de uso de CL. Además, por primera vez se observa que este incremento se está haciendo cada vez mayor con el paso de los años. La multiplicación y dispersión de AM resistente tiene un rol muy importante en las resistencias observadas en el primer año de uso de CL, debiendo reforzarse el apego a las recomendaciones de uso de semilla certificada, limpieza de maquinaria y demás buenas prácticas de uso de la tecnología que eviten que el AM resistente llegue o se genere en la chacra, ya que una vez que lo haga, podrá comprometer el control de malezas en los años subsiguientes.

BIBLIOGRAFÍA

- BASF.** 2016. «CLEARFIELD® En Arroz.» *Revista Arroz* 87:36–37.
- Croughan, T.P.** 1998. Herbicide resistance rice. (Patente de US N° US5773704A) Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. p.1–10. <https://patents.google.com/patent/US5773704A/en>
- Dauer, J.; Hulting, A.; Carlson, D.; Mankin, L.; Harden, J.; Mallory-smith, C.** 2018. Gene flow from single and stacked herbicide-resistant rice. *Pest Management Science* 74(2):348–55. <https://doi.org/10.1002/ps.4711>
- Dellaporta, S.L.; Wood, J.; Hicks, J.B.** 1983. A plant DNA minipreparation: Version II.» *Plant Molecular Biology Reporter* 1(4):19–21. <https://doi.org/10.1007/BF02712670>
- Delouche, J.C.;Burgos, N.R.; Gealy, D.R.; Zorrilla De San Martin, G.; Labrada.** 2007. Weedy rices. Origin, biology, ecology and control. Roma (IT): FAO, 131 p. (FAO Plant Production and Protection Paper; 188)
- Gealy, D.R.; Mitten, D.H.; Rutger, J.N.** 2003. Gene flow between red rice (*Oryza sativa*) and herbicide-resistant rice (*O. sativa*): Implications for Weed Management. «Commentary.» *Weed Technology* 17(3):627–45.
- Livore, A.B.; Prina, A.R.; Birk, I.; Singh, B.** 2007. Rice plant having increased tolerance to midazolinone herbicides. (Patente de AR No.US 2007/0028318 A1) Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina, p. 1–55. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2005020673>
- Merotto, A.; Goulart, I.C.G.R.; Nunes, A.L.; Kalsing,A.;Markus,C.;Menezes, V.G.; Wander, A.E.** 2016. Evolutionary and social consequences of introgression of nontransgenic herbicide resistance from rice to weedy rice in Brazil. *Evolutionary Applications* 9(7):837–46. <https://doi.org/10.1111/eva.12387>
- Rosas, J. E.; Gómez, A.; Lago, F.; Macedo, I.** 2013. Monitoreo de arroz rojo resistente a imidazolinonas en chacras con uso intensivo del sistema Clearfield®.» In: Programa Nacional de Producción de Arroz; Jornada Anual Arroz-Soja, 2013, INIA Treinta y Tres. Arroz-soja: resultados experimentales 2012-2013. Treinta y Tres: INIA, 2013. cap. 5, p. 3-5 (INIA Serie Actividades de Difusión; 713)
- Rosas, J.E.; Bonnacarrère, V.; Pérez de Vida, F.** 2014. One-step, codominant detection of imidazolinone resistance mutations in weedy rice (*Oryza sativa* L.). *Electronic Journal of Biotechnology*, 17(2):95-101. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2014.02.003>

- Roso, A.C.; Merotto Jr, A.; Delatorre, C.A.; Menezes, V.G.** 2010. Regional scale distribution of imidazolinone herbicide-resistant alleles in red rice (*Oryza sativa* L.) determined through SNP markers. *Field Crops Research* 119(1):175–82. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.006>
- Scarabel, L.; Cenghialta, C.; Manuello, D.; Sattin, M.** 2012. Monitoring and management of imidazolinone-resistant red rice (*Oryza sativa* L., var. *Sylvatica*) in Clearfield® italian paddy rice. *Agronomy* 2(4):371–83. <https://doi.org/10.3390/agronomy2040371>
- Shivrain, V.K.; Burgos, N.R.; Gealy, D.R.; Sales, M.A.; Smith, K.L.** 2009. Gene flow from weedy red rice (*Oryza sativa* L.) to cultivated rice and fitness of hybrids. *Pest Management Science* 65(10):1124–29. <https://doi.org/10.1002/ps.1802>

6 - RESISTENCIA DE CAPINES A HERBICIDAS EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE ARROZ

C. Marchesi¹

PALABRAS CLAVE: *Echinochloa* sp., imidazolinonas, inhibidores de la ALS

INTRODUCCIÓN

Entre las diferentes formas de controlar malezas en un sistema de producción, el que más ha prevalecido en las últimas décadas es el control químico. No quedan dudas que dicho control presenta ventajas desde el punto de vista práctico y en muchos casos, económico. Otras opciones como el control mecánico, presenta costos elevados de energía y problemas ambientales como la erosión de suelos; el control cultural, requiere de mayor planificación y su eficiencia no siempre es elevada; el control biológico,

también requiere de mayor planificación y tiempo de ejecución, además de que no es aplicable en todos los casos. La alta dependencia para con el control químico ha aparejado grandes problemas, como la aparición de malezas resistentes a los herbicidas.

La resistencia es la habilidad heredable de una planta de sobrevivir y reproducirse luego de haber sido expuesta a una dosis de herbicida que, en condiciones normales, hubiera sido letal para la especie (WSSA, 1998). Dentro de una población existen individuos con diferencias genéticas en distintas características,

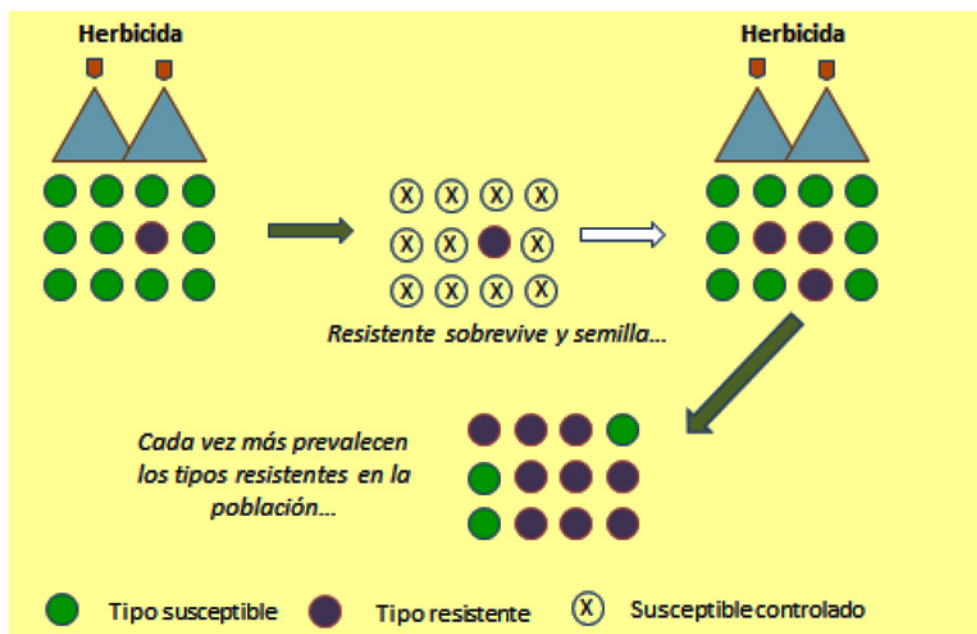


Figura 1. Evolución de resistencia a herbicidas en una población de malezas, bajo presión de selección impartida por el uso de herbicidas.

¹ Claudia Marchesi. Ing. Agr. M.Sc. Ph.D. INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz. cmarchesi@inia.org.uy

entre las cuales puede estar la habilidad de sobrevivir a un herbicida. Bajo presión de selección impartida por nuestras prácticas agronómicas, esos individuos -que conforman un biotipo- van prevaleciendo en la población, hasta hacerse mayoritarios, evolucionando de una población susceptible a una resistente a dicho herbicida (Figura 1) (Cousens y Mortimer, 1995; Gressel, 2002). Cuanto mayor sea la presión de selección ejercida, más rápidamente se dará esta evolución, ya que los sobrevivientes se corresponderán con el biotipo resistente en mayor proporción. La visualización de un problema de malezas resistentes generalmente se hace evidente cuando la proporción de plantas no controladas supera un 30% (Kogan y Perez, 2003).

La evolución de resistencia está asociada a muchos factores, unos dependientes de la especie de maleza en cuestión, otros del herbicida, así como del manejo agronómico que se realiza (o sea la presión de selección), e incluso del ambiente.

En cuanto a las características asociadas a la especie maleza, se destacan su biología, ecología, y genética. Por ejemplo, el ciclo de vida, la forma de reproducción, la capacidad de producción y longevidad de las semillas, el tamaño de la población, su capacidad colonizadora, la dormancia y germinación, la adaptabilidad ecológica, la genética de la resistencia, la frecuencia original de mutaciones resistentes y el modo de herencia. La probabilidad de ocurrencia de mutaciones resistentes y la chance de ser seleccionadas está muy asociada al tamaño de la población susceptible; cuanto mayor la población, mayor será la oportunidad de seleccionar un tipo resistente (Jasieniuk *et al.*, 1996; Preston y Powles, 2002). Las especies que tienen mayor habilidad colonizadora son más proclives a responder ante presión de selección (Gressel, 2002). La dormancia prolongada y germinación no uniforme enlentece la evolución de resistencia cuando se usan herbicidas no residuales, ya que los nuevos mutantes se diluyen en la población al haber continuas emergencias de tipos

susceptibles desde el banco de semillas del suelo. Por el contrario, la evolución de tipos resistentes se ve favorecida en esta misma especie si se utilizan herbicidas residuales, ya que más individuos se ven expuestos a dosis letales y subletales por un período mayor (Gressel y Segel, 1982). Existen diferencias importantes en el modo de herencia; los genes nucleares se diseminan vía polen, mientras que los citoplasmáticos solo vía semilla. Muchos genes con efecto aditivo pequeño, o un gen único, y diferencias en la dominancia de alelos (recesivos, parcialmente o completamente dominantes), va a modelar en forma diferente la evolución de la resistencia (Jasieniuk *et al.*, 1996).

Respecto a las características del herbicida, la presión de selección ejercida por los herbicidas es la más importante en determinar la evolución de resistencia (Gressel y Segel, 1982; Jasieniuk *et al.*, 1996). La misma dependerá de su toxicidad, de las dosis usadas y del modo de acción, su efecto residual y la frecuencia de uso. Las imidazolinonas (IMIs) -inhibidores de la acetolactato-sintasa (ALS)- se absorben vía radical y foliar y se mueven por apoplasto y simplasto. Son herbicidas de amplio espectro, de una alta eficiencia con muy bajas dosis, escaso riesgo de daño, y menor carga ambiental que muchos otros herbicidas; se degradan en el suelo, y no se acumulan en organismos no objetivo. Estas características los hacen muy atractivos para su uso, que generalmente se torna excesivo (Tranel y Wright, 2002).

Respecto al manejo agronómico que también determina la presión de selección, se destacan el uso de rotaciones de cultivos, de modo que éstas desfavorezcan el establecimiento de las mismas especies de malezas una y otra vez, y permitan una mayor diversidad de opciones de herbicidas a utilizar, a la vez que puedan reducir el uso de herbicidas (Beckie y Gill, 2006; Blackshaw *et al.*, 2008; Powles *et al.*, 1997). También se sugiere el uso de cultivos competitivos, así como estrategias de fertilización y manejo del riego tendientes a lograr

mejores cultivos que compitan y reduzcan la presencia de malezas (Beckie y Gill, 2006; Blackshaw *et al.*, 2008). Además, el control mecánico puede utilizarse para la promoción de germinaciones tempranas y posterior eliminación de plántulas en el barbecho antes de la siembra del cultivo, reduciendo así el banco de semillas presente (Gill y Holmes, 1997), o también el enterrar semillas para reducir su posterior germinación (Moss, 1997). También se han probado los cambios en los sistemas de cultivo para arroz, rotando la siembra en agua con siembras en seco (Fischer y Valverde, 2005; Linnquist *et al.*, 2008; Brim-DeForest *et al.*, 2017), la rotación y mezcla de productos de diferente modo de acción y la limpieza de maquinaria para evitar la dispersión de semilla resistente (Beckie, 2007; Diggle y Neve, 2001; Legere *et al.*, 2000).

En cuanto al ambiente, las diferencias pueden estar dadas por la región misma, ya que la presencia de biotipos resistentes puede facilitar su dispersión por viento, aves o el movimiento del agua de riego (Tsuji *et al.*, 2003; Kogan y Perez, 2003)

La predicción de la aparición y diseminación de la resistencia es posible a través de modelos matemáticos de creciente complejidad (Gressel y Segel, 1982; Maxwell *et al.*, 1990; Gardner *et al.*, 1998; Diggle y Neve, 2001). Los modelos permiten establecer la importancia relativa de los diversos factores que determinan la evolución hacia la resistencia. Ayudan al entendimiento y predicción de dicha evolución, y pueden auxiliar en el diseño y evaluación de la eficacia de diferentes estrategias para enlentecer la aparición de biotipos resistentes y que no solo se reaccione luego de la aparición del problema en la realidad. Son una herramienta útil, pero de difícil aplicación. Su principal utilidad es la de ayudar a orientar la investigación y explorar opciones de manejo. Para que los modelos sean ajustados a la realidad, se necesita información de parámetros biológicos y ecológicos de la población, tales como el porcentaje inicial de individuos resistentes, los años de uso de herbicidas, la adaptabilidad

ecológica de los biotipos resistentes y susceptibles, la vida media del banco de semillas, el coeficiente de selección del herbicida, la dinámica de poblaciones, el tipo de herencia, la dinámica espacial de plantas afectando el flujo de genes y la dispersión de la resistencia. En general, concluyen en tres acciones: reducir la presión de selección, rotar herbicidas e integrar medidas de control diferente (Fischer y Valverde, 2005). Desarrollos más recientes demuestran que se pueden aplicar modelos aún sin tener toda la información requerida inicialmente y que los resultados se adecúan a lo observado en el campo (Neve *et al.*, 2010). Los factores más relevantes para cambiar el resultado de la modelación implicaron a la presión de selección, que se interrumpe al utilizar modos de acción diferentes, y el tamaño de la población de malezas, muy relevante para casos como el de *Amaranthus* spp. Otros autores reportan una mayor eficacia en la mezcla de herbicidas de diferente modo de acción, pero con similar espectro de control de malezas, que la rotación de modos de acción dentro del ciclo del cultivo (Norsworthy *et al.*, 2012). Otro factor relevante a tener en cuenta en la evolución de resistencia es la dosis utilizada. Los modelos han predicho que altas presiones de selección dadas por dosis altas de herbicidas, resultan en un rápido aumento de la frecuencia de alelos R en la población, cuando la misma está dada por un solo gen dominante (monogénica). Sin embargo, también se sugiere que dosis bajas resultan rápidamente en problemas de resistencia cuando la misma está determinada por varios genes de efecto menor (poligénica). Se sugiere entonces encarar un manejo alternado en cuanto a las dosis a utilizar, si se sabe que la resistencia está causada por ambos tipos de genes (Renton *et al.*, 2014). Una aproximación diferente es la que han planteado recientemente Moss *et al.*, 2019, en la que se confecciona una «matriz de riesgo de resistencia», basado en toda la información ya relevada a nivel global (Figura 2). Se tiene en cuenta el riesgo inherente de cada herbicida,

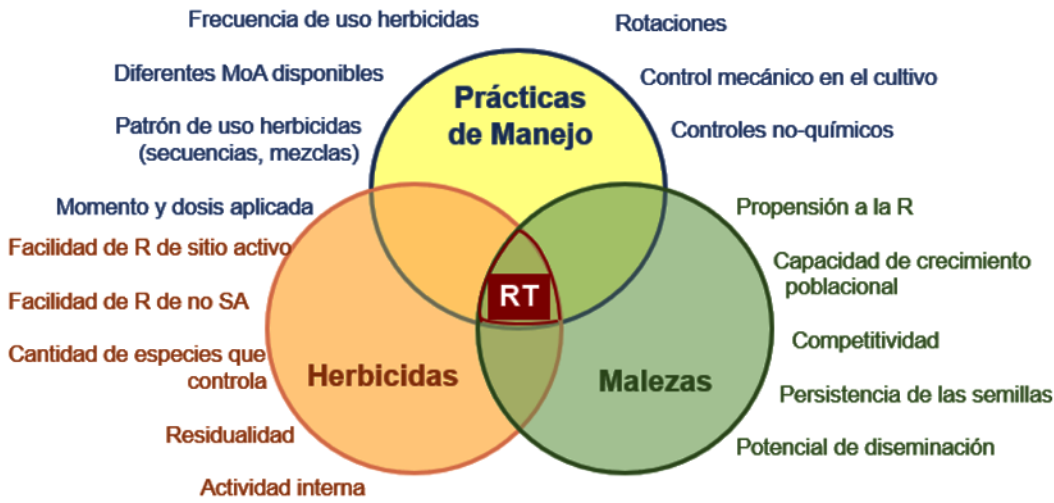


Figura 2. Principales factores de riesgo para la evolución de resistencia, y sus componentes.

de cada maleza y la agronomía que se aplica en el sistema de producción, y se construye como un semáforo, indicando dicho riesgo. Esta aproximación cuantitativa es más robusta y realista y de más fácil aplicación.

Existen diferentes mecanismos de resistencia, relacionados al sitio de acción (sitio activo) o no relacionados al mismo (no de sitio activo) (Gressel, 2002; Powles y Yu, 2010). El sitio de acción de los herbicidas es, en general, una proteína específica -enzima-, con un rol determinado en el funcionamiento de la planta. Este mecanismo por el cual el herbicida no puede actuar en el sitio de acción generalmente se da porque ha habido una mutación en dicha proteína y la molécula herbicida no encaja (Pang *et al.*, 2002; Tranel y Wright, 2002). Este tipo de resistencia es común en algunos modos de acción ya que existen varias mutaciones que le pueden conferir resistencia, haciendo relativamente fácil la selección de resistencia en estos biotipos. Por ejemplo, los inhibidores de la ALS y los de la acetil-Coenzima A-carboxilasa (ACCase), con al menos 6 sitios de la enzima que pueden mutar y conferir resistencia (Délye, 2005; Tranel y Wright, 2002). La existencia de tantas posibles mutaciones hace que la resistencia a estos herbicidas

sea abundante y rápida de seleccionar. Este mecanismo de resistencia también puede estar dado por una sobreexpresión de la enzima o de su actividad, dada por efectos postranscripcionales, reguladores de expresión, o por herencia poligénica (por ejemplo, en algunos casos de *Lolium*, *Conyza* o *Amaranthus* resistente a glifosato) (Powles y Yu, 2010). Dentro de los mecanismos que no involucran al sitio activo, el más conocido es la resistencia metabólica, donde el herbicida es desactivado dentro de la planta y no ejerce su acción. Los mecanismos enzimáticos involucrados en este proceso de degradación son variados, incluyendo las isoenzimas citocromo P450 monooxigenasas, y las glutatión-S-transferasas (Yuan *et al.*, 2007). Normalmente están involucradas en la defensa de las plantas ante estreses bióticos y abióticos. Dentro de los mecanismos que no involucran los sitios de acción, también se encuentra impedimentos en la absorción o translocación de la molécula (Powles y Preston, 2006; Powles y Yu, 2010) y compartimentación en la célula (secuestro), en que el herbicida es aislado en una vacuola (Jori *et al.*, 2007; Yasuor *et al.*, 2008).

Se pueden clasificar tipos de resistencia, como la resistencia cruzada y la

múltiple (Kogan y Perez, 2003). Resistencia cruzada es cuando un mecanismo fisiológico de resistencia le confiere la misma a varias moléculas, dentro o no de un mismo modo de acción. Puede ser de sitio activo, y en ese caso es dentro de un mismo modo de acción (por ejemplo, un cambio en la configuración de la enzima ALS, hace que tanto las sulfonilureas como las triazolpirimidinas -penoxsulam- hayan perdido eficacia). También puede ser de no-sitio activo, cuando el mecanismo trasciende modos de acción, como en el caso de un metabolismo acrecentado (por ejemplo, *Lolium* sp. degrada herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa por un incremento de metabolismo relacionado con las P450) (Beckie y Tardif, 2012). Resistencia múltiple, cuando varios eventos diferentes y secuenciales se dan en la misma población, haciendo a los individuos resistentes a diferentes modos de acción. Se asocia al uso frecuente de varios modos de acción, durante mucho tiempo, como en *Lolium rigidum* en Australia, resistente a glifosato, paraquat y ACCasa (Yu *et al.*, 2007), o de *Echinochloa crus-galli* y *E. colona* a propanil, quinclorac, y cyhalofop en USA (Rouse *et al.*, 2017)

muy elevada (alta eficiencia). Si bien las plantas sensibles demoran unas 2 semanas en morir, la detención del crecimiento se da en unas pocas horas luego de la absorción del herbicida. Los síntomas incluyen crecimiento atrofiado, clorosis intervenal, a veces venas rojizas, necrosis de hojas y puntos de crecimiento. La enzima ALS se codifica en el núcleo y se localiza en el cloroplasto (Kogan y Perez, 2003). Tiene al menos 8 sitios donde puede ocurrir una mutación que resulte en resistencia (Tranel y Wright, 2002; Beckie y Tardif, 2012), lo que hace que esta familia de herbicidas esté catalogada como de «alto riesgo de evolución de tipos resistentes». Hay reportadas 165 especies de malezas resistentes a estos herbicidas a nivel mundial, con varios casos de cada una (Heap, 2020). Hay reportes de que simplemente tres aplicaciones de inhibidores de ALS pueden inducir la evolución de tipos resistentes (Powles *et al.*, 1997). A su vez, como fue mencionado anteriormente, su inocuidad para los organismos no objetivo y su alta efectividad con muy bajas dosis facilitan su manejo y rápida adopción, siendo en general herbicidas «económicos». Dentro de la familia hay cinco grupos (Tabla 1) y cada mutación descubierta a la fecha le confiere resistencia a uno o varios de los grupos, siendo en muchos casos, cruzadas. Los patrones más conocidos de resistencia cruzada se dan entre los grupos de sulfonilureas y triazolpirimidinas (*1), y entre las IMIs y los piridinilbenzoatos (*2). La mayoría de las mutaciones conocidas

HERBICIDAS INHIBIDORES DE LA ALS

Los inhibidores de la enzima ALS impiden la síntesis de algunos aminoácidos esenciales para la planta (valina, leucina e isoleucina), por lo que su mortalidad es

Tabla 1. Moléculas de inhibidores de la ALS clasificadas según su química (grupo) y patrones de resistencia cruzada más comunes.

Grupos	Moléculas	Resistencia cruzada
Sulfonilureas	Pyrazosulfurón, metsulfurón,	*1
Imidazolinonas	Imazapir, imazapic	*2
Triazolpirimidinas	Penoxsulam	*1
Piridinilbenzoatos	Bispiribac	*2
Sulfonilamino-carboniltriázolinonas	<i>Flucarbazone (no se usa en arroz)</i>	

pueden conferirle resistencia de las malezas a las IMLs (Beckie y Tardif, 2012).

MALEZAS PROBLEMA EN SISTEMAS ARROCEROS

Se han reportado más de 160 casos de malezas resistentes a herbicidas en arroz en el mundo incluyendo gramíneas, hojas anchas y ciperáceas, y considerando varios modos de acción. Dentro de las principales malezas en sistemas arroceros de Uruguay, los capines (*Echinochloa* spp.) y el arroz maleza -AM- (*Oryza sativa*) son los más relevantes. Este capítulo se centra en el tema del capín.

El complejo de las *Echinochloa* spp. es de los más importantes en haber generado resistencia a herbicidas. Pertenecen a la familia de las Poaceae; son gramíneas que se encuentran en todo el mundo, tanto en zonas templadas como tropicales. Son malezas de tipo C4 que generan una alta competencia y de alta prolificidad. Varias especies están citadas como las malezas más importantes del arroz y otros cultivos en diferentes sistemas de producción, lo que demuestra su gran plasticidad (Barrett y Wilson, 1981a, 1981b; Holm *et al.*, 1977; Vidotto *et al.*, 2007; Yabuno, 1966). Además, son altamente polimórficas (Michael, 1983) y algunas de sus especies se cruzan, lo que hace más difícil su reconocimiento correcto (Norris, 1996; Pratley *et al.*, 2008; Vidotto *et al.*, 2007; Yabuno, 1966). *Echinochloa crus-galli* es la maleza más común y abundante de este grupo, tiene morfología variable y se adapta muy bien a condiciones húmedas. Se encuentra tanto en taipas como en partes bajas de los campos, pero no germina bajo el agua (Barrett y Seaman, 1980).

Existen reportes de *Echinochloa* spp. resistentes a inhibidores de la ALS en 18 países, en muchos casos asociados al uso inadecuado de la tecnología Clearfield®. Para *E. crus-galli* hay reportados en el mundo 34 casos de resistencia relacionados al cultivo de arroz, resistentes a 7 modos de acción (a auxinas sintéticas,

ej. quinclorac; a cloroacetamidas, ej. butaclor; a tiocarbamatos ej. molinate; a amidas, ej. propanil; a ACCasas, ej. cyhalofop; a inhibidores de ALS, ej. imazapir + imazapic, nicosulfurón, penoxsulam, y a inhibidores de DOXP, ej. clomazone). Existen además reportes de *Echinochloa* spp. resistentes presentes en otros cultivos y otras malezas resistentes presentes en arroz (Heap, 2020).

Echinochloa crus-galli presenta problemas en sistemas de producción similares al de Uruguay, como Brasil, Argentina y EE.UU. En Arkansas, hay biotipos resistentes ampliamente distribuidos, y en expansión, a herbicidas como IMLs, propanil, quinclorac, cyhalofop y algunos casos de resistencia múltiple (Rouse *et al.*, 2017). En Brasil, biotipos resistentes a IMLs, quinclorac, y múltiple (Andres *et al.*, 2013), así como a quinclorac, penoxsulam y cyhalofop (Eberhardt *et al.*, 2016). En Argentina también están muy extendidos los biotipos resistentes a inhibidores de la ALS (Metzler *et al.*, 2018). En todos estos casos, se los asocia a sistemas sin rotaciones o con rotación con otros cultivos, pero no con fase de pasturas. En algunos casos hay rotación de arroz con soja, lo que es beneficioso desde muchos puntos de vista (facilidad de rastrojo, uso de otros herbicidas), pero por otro lado aumenta la problemática de exposición a glifosato, siendo que ya hay referencias de *Echinochloa* spp. resistentes a glifosato en situaciones muy próximas al arroz (García y Marques, com. pers.). Además, en dicha rotación se producen cambios en las malezas predominantes, que pueden ser beneficiosos o muy problemáticos, según se están observando mayores presencias de *Amaranthus* spp. (yuyos colorados) en las taipas o *Conyza* spp. (yerba carnífera) que requieren de una atención especial. Ambas malezas han generado problemas de resistencia en gran cantidad de ocasiones, complejizando mucho el control.

MALEZAS RESISTENTES EN SISTEMAS ARROCEROS DE URUGUAY

Parte de la producción de arroz en Uruguay se realiza bajo un sistema de rotaciones con pasturas, lo que le imprime un bajo impacto ambiental, entre otros beneficios. Específicamente esto se refiere al mayor cuidado del recurso suelo y su fertilidad, al menor uso de agroquímicos en el tiempo, a la menor presión que se ejerce sobre el ambiente y un menor consumo de energía (Macedo *et al.*, 2020; Pittelkow *et al.*, 2016).

Sistemas más intensivos (sin rotación arroz-pasturas o en rotaciones cortas con retornos de corto plazo) conducirían a un mayor uso de agroquímicos en el tiempo (en este caso, de herbicidas). Esta tendencia al monocultivo estaría continuamente propiciando el establecimiento del mismo tipo de malezas adaptadas al sistema, lo cual resultaría en un aumento de sus poblaciones. Es sabido que el contar con una mayor población de malezas aumenta la probabilidad de encontrar mutantes que puedan ser resistentes a diversos químicos. Estos sistemas más intensivos, tanto por inducir una mayor presencia de cierto tipo de malezas, así como por utilizar más herbicidas, implicarían una mayor presión de selección sobre las poblaciones de malezas existentes, lo cual está asociado a un incremento en la probabilidad de seleccionar biotipos con niveles de resistencia (sistemas más riesgosos) (Fischer y Valverde, 2005). Un acortamiento del periodo de pasturas en la rotación llevaría a un aumento del período de cultivo y por consiguiente mayor uso de herbicidas, entre otros cambios. Por otro lado, el uso del herbicida total glifosato ha aumentado significativamente, así como también las dosis utilizadas para controlar varias malezas durante los barbechos. El uso intensivo de solo glifosato también ha generado resistencia de malezas, destacándose algunas situaciones muy cercanas (*Lolium multiflorum*, *Conyza* spp., *Digitaria insularis*, *Chloris* spp., *Eleusine indica* y *Amaranthus* spp.

en Brasil, *Sorghum halepense*, *L. multiflorum*, *Conyza* spp., *E. colona*, *Brassica* spp., *Amaranthus* spp., *D. insularis*, *E. indica* y otras en Argentina (AAPRESID-REM). En Uruguay, relevamientos recientes están constatando la presencia de *L. multiflorum*, *Amaranthus* spp., *Conyza* spp. y *E. colona* resistente a glifosato en el litoral del país y *L. multiflorum* también en la zona Este (Felix y Urioste, 2016; García y Marques com.pers.)

Además de la situación de intensificación en general, la inclusión de tecnología de arroz resistente a IMIs (no transgénico) ha propiciado un incremento del uso de inhibidores de la ALS, herbicidas calificados como de alto riesgo, la cual actualmente es la mayor responsable de casos de resistencia de malezas en varios cultivos en todo el mundo. La tecnología de arroz resistente a IMIs, como el sistema Clearfield® (BASF) y hoy en día, también Full Page (RiceTec), se creó para el control de AM, pero además es muy buena controlando otras malezas como las *Echinochloa* spp. La preocupación se da ya que, como se menciona más arriba, las mutaciones en la enzima ALS son «comunes» encontrarlas en la naturaleza, por lo que es probable que el AM u otras malezas la consigan con relativamente poca exposición a los herbicidas en cuestión (además de por flujo de genes RR de las mismas variedades CL al AM). Si se excede en el uso de dichas tecnologías, o sea, uso reiterado del mismo principio activo sin otras medidas de manejo complementarias, se estaría seleccionando a favor de tipos con resistencia a esos herbicidas y las mismas se perderían, quedando obsoleta la herramienta más efectiva para control de AM.

A partir del año 2000, aproximadamente, se comenzaron a recibir consultas y apreciaciones de técnicos del sector arrocero, acerca de la falta de control del herbicida quinclorac sobre *Echinochloa crusgalli*, lo que ameritó las colectas y pruebas de confirmación de resistencia. Además, la aparición y el aumento de uso de tecnologías Clearfield®, hizo que se incrementara el uso de inhibidores de la ALS, familia

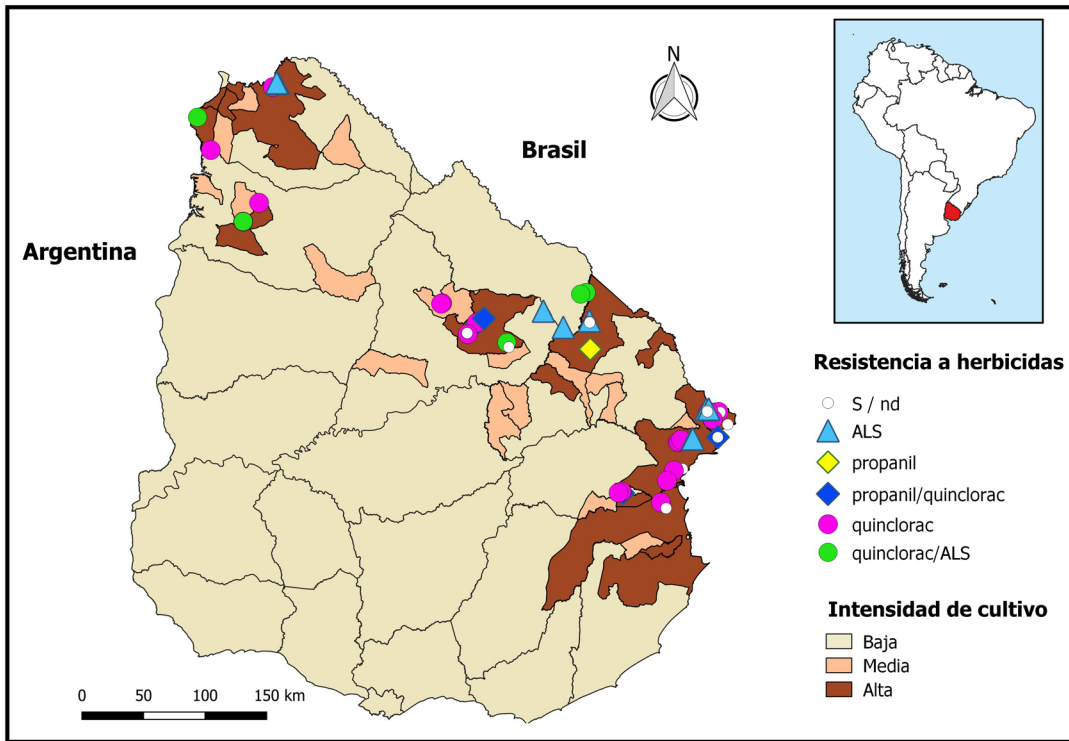


Figura 3. Distribución de los biotipos de *Echinochloa crus-galli* con resistencia a los diferentes herbicidas en uso en arroz. Se incluye la información de la intensidad de uso arrocero del área en cuestión (color más oscuro, mayor intensidad).

que ya estaba siendo utilizada en gran proporción del área arrocera. Se realizó un estudio a nivel nacional para evaluar la presencia de biotipos de *Echinochloa crus-galli* resistentes a herbicidas. Más de 40 muestras, la mayoría colectadas entre 2006 y 2018, y provenientes de las regiones Este y Centro Norte fueron evaluadas siguiendo el protocolo de confirmación definido por la HRAC ((Herbicide Resistance Action Committee). Los herbicidas utilizados incluyeron propanil, quinclorac, clomazone, bispyribac-sodium, penoxsulam, imazapyr + imazapic, profoxidim y cyhalofop. La mayoría de los biotipos evaluados (35) resultaron resistentes a quinclorac. También se confirmó resistencia a propanil en al menos 7 biotipos, 12 a imazapyr + imazapic, y 3 a penoxsulam. Cinco biotipos mostraron resistencia múltiple a propanil y quinclorac y 1 resistencia a quinclorac, penoxsulam e imazapyr + imazapic (Figura 3). No hubo confirmación

de resistencia a clomazone, bispyribac-sodium, cyhalofop o profoxidim (Marchesi y Saldain, 2019).

Dentro de ese trabajo, interesa resaltar un caso en donde se evaluaron biotipos de capín colectados en la situación descrita por Rosas *et al* (Cuadro 1, Cap.4). En la misma conviven varias chacras contiguas con distinta historia de aplicaciones del herbicida asociado a la tecnología CL. En esta situación, se detectó un biotipo E3CL, colectado en escapes de un área que había sido tratada con IMIs cuatro veces en tres años continuos de arroz CL, cuyo GR₅₀ fue 1,8 la dosis de etiqueta (98 g i.a./ha). Por otro lado, los biotipos E0CL (sin historia de arroz CL), y E1CL y E2CL (con una y dos aplicaciones del herbicida, respectivamente) murieron con la mínima dosis usada en la evaluación. Además, se estudió la resistencia cruzada a otros inhibidores de la ALS como penoxsulam y bispiribac, no detectándose problemas

de control para estos herbicidas (Saldain y Sosa, 2012, 2016).

La evaluación de mecanismos de resistencia en los casos confirmados no se ha culminado, habiendo casos más característicos de lo que sería resistencia por metabolismo (caso de *E. crus-galli* resistente a los 3 herbicidas IMIs, quinclorac y penoxsulam) y otros de sitio activo (*E. crus-galli* resistente a quinclorac, Saldain y Sosa, 2016; Diez *et al.*, 2020). Otros estudios locales indican también la ausencia de mutaciones en la enzima ALS reportadas a nivel mundial en capines provenientes de sistemas con uso intensivo de CL (Bonecarrere *et al.*, 2016). Por otro lado, el uso de inhibidores de las monooxigenasa P450 revierten la resistencia en algunos biotipos como el E3CL, denotando resistencia de tipo metabólica (Saldain y Sosa, 2016), pero no ocurre lo mismo en otros biotipos. Queda pendiente establecer qué otro mecanismo de tipo metabólico se encuentra presente en estos biotipos locales.

ESTRATEGIAS PARA REDUCIR EL RIESGO DE EVOLUCIÓN A BIOTIPOS RESISTENTES

Además del esfuerzo que se realiza para encontrar soluciones a la problemática de resistencia en malezas ya instalada, es de vital importancia considerar estrategias para reducir el riesgo de evolución de más biotipos resistentes. Dichas estrategias se basan fundamentalmente en dos principios: 1. reducir la presión de selección y 2. evitar la dispersión de individuos resistentes.

Las prácticas que se pueden recomendar en este sentido incluyen la rotación de cultivos o sistemas de producción (Beckie y Gill, 2006; Blackshaw *et al.*, 2008; Bourgeois *et al.*, 1997; Gill y Holmes, 1997; Powles *et al.*, 1997; Opena *et al.*, 2019), la rotación y uso de mezclas de herbicidas (Beckie, 2007; Bourgeois *et al.*, 1997; Fischer y Valverde, 2005; Legere *et al.*, 2000) y técnicas de control cultural -no químico- de las malezas (Beckie, 2006; Blackshaw

et al. 2008; Bourgeois y Morrison, 1997; Fischer y Valverde, 2005; Gill y Holmes, 1997). Por otro lado, también se enfatiza en reducir los individuos sobrevivientes, para disminuir la producción de semillas de los mismos (Diggle y Neve, 2001; Legere *et al.*, 2000), y destruir las semillas remanentes de malezas mediante dispositivos que se anexan a equipos de cosecha (seed harvester or destructor) (Somerville *et al.*, 2018; Walsh *et al.*, 2012).

BIBLIOGRAFÍA

- Andres, A.; Theisen, G.; Concenco, G.; Galon, L.** 2013. Weed resistance to herbicides in rice fields in Southern Brazil. In: Price, A.J.; Kelton, J.A. (eds). *Herbicides - current research and case studies in use*. Croatia: Intech. pp. 3–26. <https://doi.org/10.5772/55947>
- Barrett, S.C.H.; Seaman, D.E.** 1980. The weed flora of californian rice fields. *Aquatic Botany*, 9: 351–376. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(80\)90036-4](https://doi.org/10.1016/0304-3770(80)90036-4)
- Barrett, S.C.H.; Wilson, B.F.** 1981a. Colonizing ability in the *Echinochloa crus-galli* complex (barnyard grass). II. Seed biology. *Canadian Journal of Botany*, 61(2): 556–562. <https://doi.org/10.1139/b83-063>
- Barrett, S.C.H.; Wilson, B.F.** 1981b. Colonizing ability in the *Echinochloa crus-galli* complex (Barnyardgrass). I. Variation in life history. *Canadian Journal of Botany*, 59: 1844–1860. <https://doi.org/10.1139/b81-245>
- Beckie, H.J.** 2006. Herbicide-resistant weeds: management tactics and practices. *Weed Technology*, 20(03): 793–814. <https://doi.org/10.1614/wt-05-084r1.1>
- Beckie, H.J.** 2007. Beneficial management practices to Combat herbicide-resistant Grass weeds in the Northern Great Plains. *Weed Technology*, 21(2): 290–299. <https://doi.org/10.1614/wt-06-083.1>
- Beckie, H.J.; Gill, G.** 2006. Strategies for managing herbicide-resistant weeds. In H. Singh, D. R. Batish, & R. K. Kohli (Eds.), *Handbook of sustainable weed management*. New York: Food Products Press. pp. 581–625.

- Beckie, H.J.; Tardif, F.J.** 2012. Herbicide cross resistance in weeds. *Crop Protection*, 35: 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.12.018>
- Blackshaw, R.E.; Harker, K.N.; Smith, E.G.; Beckie, H.J.; O'Donovan, J.T.** 2008. Ongoing development of integrated weed management systems on the canadian prairies. *Weed Science*, 56(1): 146–150. <https://doi.org/10.1614/ws-07-038.1>
- Bonnecarrère, V.; Iriarte, W.; Saldain, N.** 2016. La resistencia que expresa el biotipo de capín E3CL al Kifix, ¿a qué mecanismo es debida? In INIA (Ed.), *Resultados Experimentales de Arroz 2015-2016*. Treinta y Tres: INIA. p. 18-19. (INIA Serie Actividades de Difusión 765)
- Bourgeois, L.; Kenkel, N.C.; Morrison, I.N.** 1997. Characterization of cross-resistance patterns in Acetyl-CoA Carboxylase inhibitor resistant wild oat (*Avena fatua*). *Weed Science*, 45(6): 750–755. <https://doi.org/10.1017/S0043174500088925>
- Brim-DeForest, W.B.; Al-khatib, K.; Linqvist, B.A.; Fischer, A.J.** 2017. Weed community dynamics and system productivity in alternative irrigation systems in California rice. *Weed Science*, 65: 177–188. <https://doi.org/10.1614/WS-D-16-00064.1>
- Cousens, R.; Mortimer, M.** 1995. *Dynamics of weed population*. Cambridge: University Press. 332 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511608629>
- Délye, C.** 2005. Weed resistance to acetyl coenzyme A carboxylase inhibitors: an update. *Weed Science*, 53: 728–746. <https://doi.org/10.1614/WS-04-203R.1>
- Diez, M.; Sainz, M.; Saldain, N.; Marchesi, C.; Bonnecarrère, V.; Diaz, P.** 2020. Limited induction of ethylene and cyanide synthesis are observed in Quinclorac- resistant barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) in Uruguay. *Weed Science*, 68(4):348-357. <https://doi.org/doi:10.1017/wsc.2020.32>
- Diggle, A.; Neve, P.** 2001. The population dynamics and genetics of herbicide resistance—a modelling approach. In: Powles, S.B.; Shaner, D. (Eds.), *Herbicide resistance and world grains*. New York: CRC Press. p. 61–99.
- Eberhardt, D.S.; Oliveira Neto, A.M.; Noldin, J.A.; Vanti, R.M.** 2016. Barnyardgrass with multiple resistance to synthetic auxin, ALS and ACCase inhibitors. *Planta Daninha*, 34(4):823–832. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582016340400023>
- Felix, E.; Urioste, S.** 2016. *Primer reporte de resistencia a glifosato en poblaciones de Lolium multiflorum Lam en Uruguay, y susceptibilidad de éstas a herbicidas inhibidores de las ACCasa*. Montevideo: UDELAR.
- Fischer, A.J.; Valverde, B.E.** 2005. Evolución de resistencia a herbicidas, diagnóstico y manejo en malezas de arroz. In: Rios, A. (Ed.). *Seminario-Taller Iberoamericano: resistencia a herbicidas y cultivos transgénicos*. Colonia del Sacramento: INIA; FAO; FAGRO.
- Gill, G.S.; Holmes, J.E.** 1997. Efficacy of cultural control methods for combating herbicide-resistant *Lolium rigidum*. *Pesticide Science*, 51: 352–358.
- Gressel, J.** 2002. *Molecular biology of weed control*. London: Taylor & Francis. 504 p.
- Gressel, J.; Segel, L.A.** 1982. Interrelating factors controlling the rate of appearance of resistance: the outlook for the future. In: LeBaron, H.; Gressel, J. (Eds.), *Herbicide resistance in plants*. New York: John Wiley & Sons. p. 325–347.
- Heap, I.M.** 2020. The international survey of herbicide resistant weeds. Retrieved March 31, 2020, from www.weedscience.org
- Holm, L.; Pucknett, D.; Pancho, J.; Heberger, J.** 1977. *The world's worst weeds : distribution and biology*. Honolulu, HI: University Press of Hawaii. 609 p.
- HRAC** <https://www.hracglobal.com/>
- Jasieniuk, M.; Brule-babel, A.L.; Morrison, I.N.** 1996. The evolution and genetics of herbicide resistance in weeds. *Weed Science*, 44(1): 176–193. <https://doi.org/10.1017/S0043174500093747>
- Jori, B.; Sóos, V.; Szego, D.; Páldi, E.; Szigeti, Z.; Rácz, I.; Lásztity, D.** 2007. Role of transporters in Paraquat resistance of horseweed *Conyza canadensis* (L.) Cronq . *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 88, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2006.08.013>

- Kogan, M.; Perez J., A.** 2003. *Herbicidas. Fundamentos fisiológicos y bioquímicos del modo de acción*. Santiago de Chile: Universidad Católica de Chile.
- Légère, A.; Beckie, H.; Stevenson, F.; Thomas, A.** 2000. Survey of management practices affecting the occurrence of wild oat (*Avena fatua*) resistant to acetyl CoA carboxylase inhibitors. *Weed Technology*, 14(2): 366–376. [https://doi.org/10.1614/0890-037X\(2000\)014\[0366:SOMPAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0890-037X(2000)014[0366:SOMPAT]2.0.CO;2)
- Linquist, B.; Fischer, A.J.; Godfrey, L.; Greer, C.; Hill, J.; Koffer, K.; Moeching, M.; Mutters, R.; van Kessel, C.** (2008). Minimum tillage could benefit California rice farmers. *California Agriculture*, 62(1):24–29.
- Macedo, I.; Carrasco-Letelier, L.; Velasco, J.I.; Siri-Prieto, G.; Terra, J. A.** 2020. Intensification alternatives to rice-pasture systems: energy use efficiency. In: Andres, A. Scivittaro, W. (Eds.), *International Temperate Rice Conference (7./ :2020. Pelotas, Brazil)* Pelotas: Embrapa.p. 18–19.
- Marchesi, C.; Saldain, N.** 2019. First report of herbicide-resistant *Echinochloa crus-galli* in uruguayan rice fields. *Agronomy*, 9, 790–809. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120790>
- Metzler, M.; Rampoldi, A.; Dellaferrera, I.** 2018. Alerta rojo: *Echinochloa crus-galli* «capín arroz», resistente a glifosato e imidazolinonas en la Provincia de Entre Ríos. Buenos Aires: INTA.
- Michael, P.** 1983. Taxonomy and distribution of *Echinochloa* species with special reference to their occurrence as weeds of rice. In IRRI (Ed.), *Weed control in rice*. Phillipines: IRRI. p. 291–306.
- Moss, S.** 1997. Strategies for the prevention and control of herbicide resistance in annual grass weeds. In: De Prado, R.; Jorrin, j. García Torres, L. (Eds.), *Weed and crop resistance to herbicides*. London: Kluwer Academic. p. 225–252.
- Moss, S.; Ulber, L.; Hoed, I. d.** 2019. A herbicide resistance risk matrix. *Crop Protection*, 115: 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.09.005>
- Neve, P.; Norsworthy, J.K.; Smith, K.L.; Zelaya, I.A.** 2010. Modelling evolution and management of glyphosate resistance in *Amaranthus palmeri*. *Weed Research*, (51):99–112. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00838.x>
- Norris, R.F.** 1996. Morphological and phenological variation in barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) in California. *Weed Science*, 44(4): 804–814. <https://doi.org/10.1017/S0043174500094753>
- 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.; Barrett, M.** 2012. Reducing the risks of herbicide resistance: best management practices and recommendations. *Weed Science*, 60(1): 31–62. <https://doi.org/10.1614/WS-D-11-00155.1>
- Opena, J.; Pratley, J.; McCormick, J.; Wu, H.; Lemerle, D.** 2019. Pasture legumes offer promise to control barnyard grass in delayed permanent water systems in rice. In: Pratley, J. E. (Ed.). *Proceedings of the 19th Australian Society of Agronomy Conference*. Wagga-Wagga: Australian Society of Agronomy. p. 1–4.
- Pang, S.S.; Duggleby, R.G.; Guddat, L.W.** 2002. Crystal structure of yeast acetohydroxyacid synthase: A target of herbicidal inhibitors. *Journal of Molecular Biology*, 317(2): 249–269. <https://doi.org/10.1006/jmbi.2001.5419>
- Pittelkow, C.M.; Zorrilla, G.; Terra, J.; Riccetto, S.; Macedo, I.; Bonilla, C.; Roel, A.** 2016. Sustainability of rice intensification in Uruguay from 1993 to 2013. *Global Food Security*, 9, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.05.003>
- Powles, S.B.; Preston, C.** 2006. Evolved glyphosate resistance in plants: biochemical and genetic basis of resistance. *Weed Technology*, 20(2): 282–289. <https://doi.org/10.1614/WT-04-142R.1>
- Powles, S.B.; Preston, C.; Bryan, I.B.; Jutsum, A.R.** 1997. Herbicide resistance: Impact and management. *Advances in Agronomy*, 58, 57–93.
- Powles, S.B.; Yu, Q.** 2010. Evolution in action/ : plants resistant to herbicides. *Annual Review in Plant Biology*, 61, 317–347. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112119>

- Pratley, J.E.; Broster, J.C.; Michael, P.** 2008. Echinochloa spp. in Australian rice fields - species distribution and resistance status. *Australian Journal of Agricultural Research*, 59, 639–645.
- Preston, C.; Powles, S.** 2002. Evolution of herbicide resistance in weeds: initial frequency of target-site based resistance to acetolactate synthase inhibiting herbicides in *Lolium rigidum*. *Heredity*, 88:8–13. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800004>
- Renton, M.; Busi, R.; Neve, P.; Thornby, D.; Vila-Aiub, M.** 2014. Herbicide resistance modelling/ : past , present and future. *Pest Management Science*, 70(9): 1394–1404. <https://doi.org/10.1002/ps.3773>
- Rouse, C.E.; Roma-Burgos, N.; Norsworthy, J.K.; Tseng, T.M.; Starkey, C.E.; Scott, R.C.** 2017. Echinochloa resistance to herbicides continues to increase in Arkansas rice fields. *Weed Technology*, 32(1):34–44. <https://doi.org/10.1017/wet.2017.82>
- Saldain, N.; Sosa, B.** 2012. Susceptibilidad de los biotipos de capín colectados en sitios con distinta intensidad de uso del arroz Clearfield® al Kifix®. In INIA (Ed.), *Resultados Experimentales de Arroz 2011-2012*. Treinta y Tres: INIA. p. 18–21. (INIA Serie Actividades de Difusión; 686)
- Saldain, N.; Sosa, B.** 2016. ¿Qué papel juega la resistencia metabólica en la expresión de la resistencia a Quinclorac y a Kifix en algunos biotipos de capín de la zona este de Uruguay? In: INIA (Ed.), *Resultados Experimentales de Arroz 2015-2016*. Treinta y Tres: INIA. p. 15-17 (INIA Serie Actividades de Difusión; 765).
- Somerville, G.; Powles, S.; Walsh, M.; Renton, M.** 2018. Modeling the impact of harvest weed seed control on herbicide-resistance evolution. *Weed Science*, 66(3):395–403. <https://doi.org/10.1017/wsc.2018.9>
- Tranel, P.J.; Wright, T.R.** 2002. Review resistance of weeds to ALS-inhibiting herbicides/ : what have we learned/ ? *Weed Science*, 50(6):700–712. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0700:RROWTA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0700:RROWTA]2.0.CO;2)
- Tsuji, R.; Fischer, A.J.; Yoshino, M.; Hill, J.E.; Roel, A.; Yamasue, Y.** 2003. Herbicide-resistant late watergrass (*Echinochloa phyllopogon*): similarity in morphological and amplified fragment length polymorphism traits. *Weed Science*, 51(5):740–747. <https://doi.org/10.1614/P2002-143>
- Vidotto, F.; Tesio, F.; Tabacchi, M.; Ferrero, A.** 2007. Herbicide sensitivity of *Echinochloa* spp . accessions in italian rice fields. *Crop Protection*, 26(3):285–293. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2005.07.016>
- 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*, 52(3):1343–1347. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.11.0608>
- WSSA.** 1998. Technology Notes. *Weed Technology*, 12(4):789–790.
- Yabuno, T.** 1966. Biosystematic study of genus *Echinochloa*. *Japanese Journal of Botany*, 19, 277.
- 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*, 64(10):1031–1039. <https://doi.org/10.1002/ps.1604>
- Yu, Q.; Cairns, A.; Powles, S.** 2007. Glyphosate, paraquat and ACCase multiple herbicide resistance evolved in a *Lolium rigidum* biotype. *Planta*, 225(2):499-513. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0364-3>
- Yuan, J. S.; Tranel, P. J.; Stewart Jr, C.N.** 2007. Non-target-site herbicide resistance: a family business. *Trends in Plant Science*, 12(1):6-13. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.11.001>

7 - DISIPACIÓN DE LOS RESIDUOS REMANENTES DE LAS IMIDAZOLINONAS Y SU INCIDENCIA EN LOS CULTIVOS SIGUIENTES

N.E. Saldain¹

PALABRAS CLAVE: degradación microbiana, persistencia, toxicidad imazapir e imazapic

GENERALIDADES DE LAS IMIDAZOLINONAS

Las imidazolinonas se comportan como un ácido débil en la solución del suelo, siendo el pH el determinante de su dinámica. En sus moléculas presentan un anillo del grupo imidazolinona que tiene radicales metil e isopropil en el carbono de la posición 4 (núcleo común a la familia), mientras que en el carbono 2 de ese grupo se unen estructuras en anillo de benceno, piridina o quinolina (Anderson, 1996). Estos herbicidas muestran varias constantes de disociación relacionadas a

los grupos funcionales según el pH de la solución (Capítulo 1, Figura 4, Tabla 4). Estas propiedades hacen que en solución estos herbicidas se encuentren como una mezcla de moléculas con carga positiva (Figura 1, «1»), sin carga (Figura 1, «2»), con ambas cargas simultáneamente (Figura 1, «3»), o con carga negativa (Figura 1, «4»).

Mangels (1991) mostró como la composición de las formas químicas varía en función del pH de la solución (Figura 2). En todos los suelos estudiados las imidazolinonas presentaron una adsorción muy

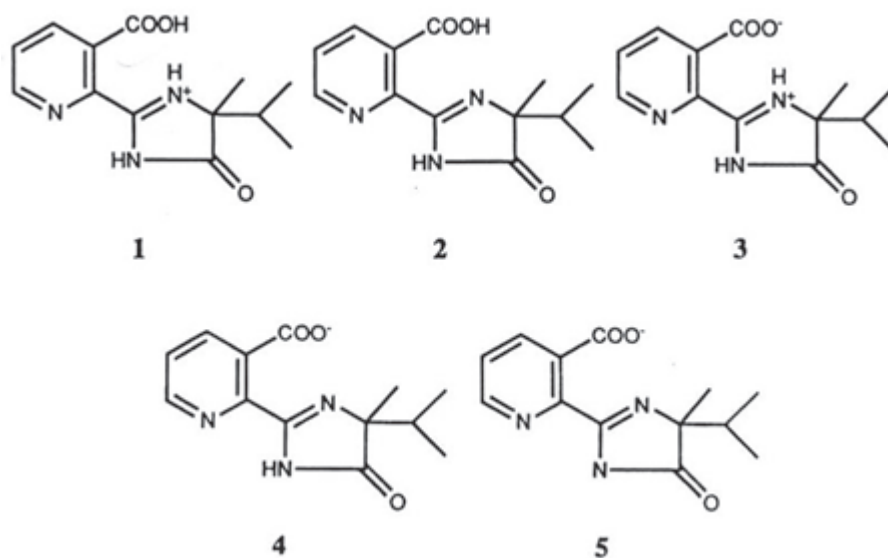


Figura 1. Distintas formas químicas de las imidazolinonas en la solución acuosa (tomada de Mangels, 1991).

¹ Néstor Saldain. Ing. Agr. M.Sc. INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz (hasta junio 2021). nsaldain56@gmail.com

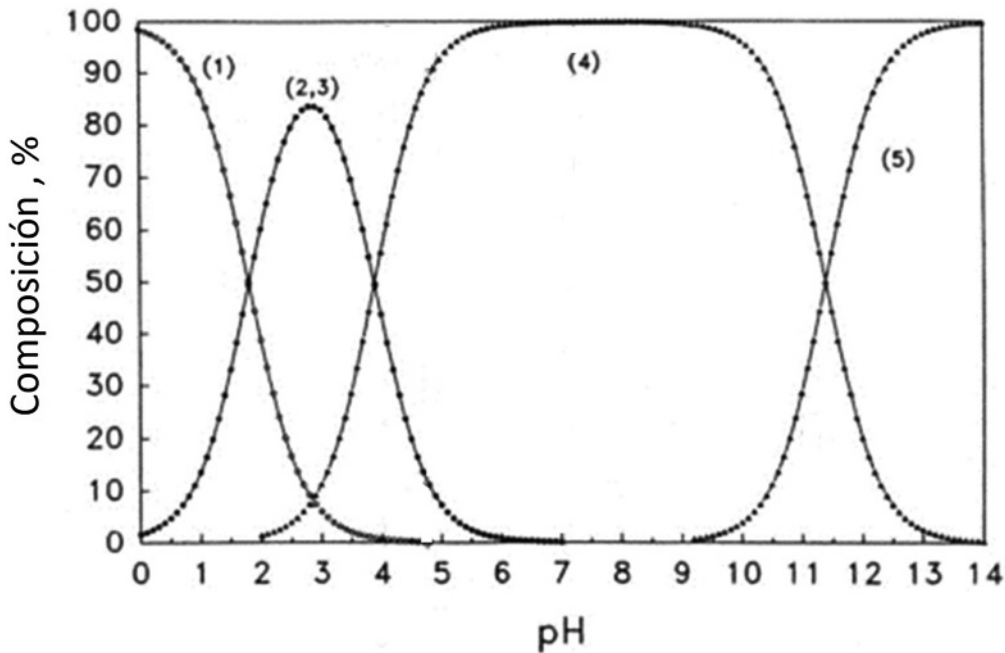


Figura 2. Efecto del pH de la solución acuosa en la composición de distintas formas químicas (tomada de Mangels, 1991).

débil a pH mayores que 6 y en el rango de pH de 3 a 6, la adsorción aumenta significativamente cuando el pH es más ácido (Figura 3). Además, señaló el hecho de que pequeñas reducciones en el pH del orden de 0,2 a 0,4 unidades por debajo

de 5,5 pueden duplicar el coeficiente de adsorción o distribución (K_d), debido a que aumenta significativamente la cantidad de la forma química «2», que está en equilibrio con la forma «3», reteniéndose en los coloides de la materia orgánica

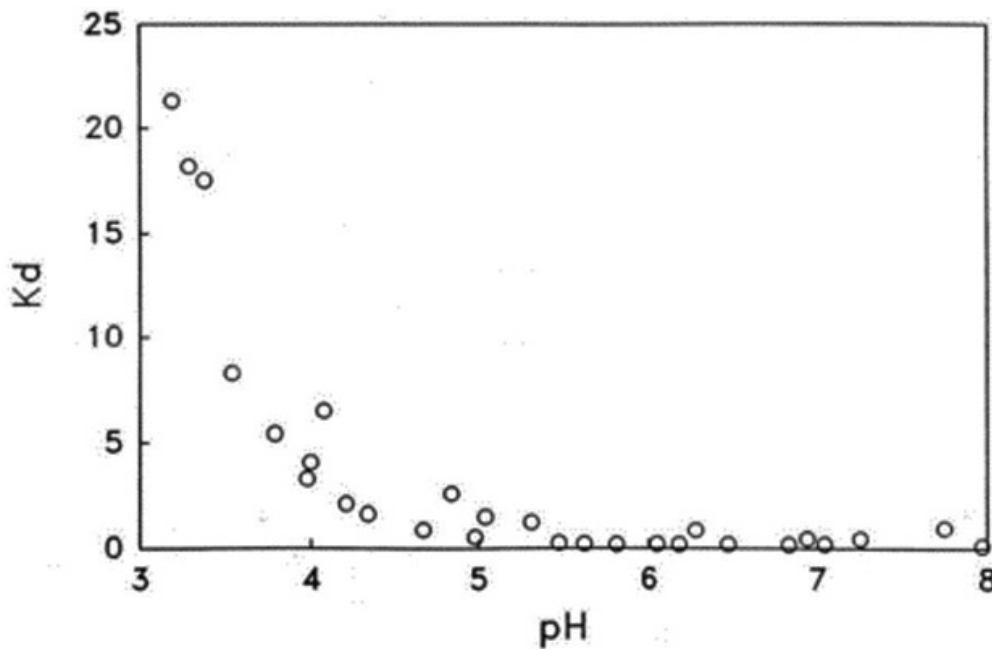


Figura 3. Efecto del pH en el coeficiente de distribución (K_d) entre la matriz coloidal del suelo y el agua (tomada de Mangels, 1991).

del suelo. Al aumentar la polaridad de las imidazolinonas debido a que está disociado el grupo carboxilo (COO^-), se incrementa su solubilidad en agua, siendo muy débilmente retenido en el suelo o repelido, quedando disponible los residuos en la solución del suelo para la metabolización por los microorganismos y eventualmente, para la lixiviación hacia horizontes más profundos.

El autor señala que a pH entre 5 y 9 predomina la forma química «4», mientras que cuando se reduce el pH por debajo de 5 aumenta en mayor proporción la forma «2». Esta forma «2» no tiene cargas, no está disociada, por lo que tiene un comportamiento similar a los herbicidas no iónicos en el suelo, estando su adsorción en función del contenido de materia orgánica. Por otro lado, la forma «4» que tiene carga negativa, grupo carboxilo disociado, se unirá muy débilmente a la materia orgánica del suelo o puede ser repelida por las cargas negativas de ésta y la fracción arcilla, y se podría unir bien a ciertos minerales (Mangels, 1991). Uno de esos minerales es la hematita, compuesta por óxidos de hierro que se presentan como cationes (cargas positivas) en los suelos agrícolas con pH entre 5,5 y 6,5, mostrando gran capacidad de adsorción (Helling, 2005).

DINÁMICA DEL PH EN EL SUELO BAJO INUNDACIÓN

En el país, los suelos arroceros presentan un rango de pH en el horizonte superficial entre 4,8 y 6,5, correspondiendo los más ácidos a suelos de contenido bajo de materia orgánica, con menor proporción de arcilla y más arena, mientras que aquellos de pH más elevados tienen mayor proporción de materia orgánica, limo y arcilla. Por lo tanto, es esperable que la forma química «4» del herbicida domine en la mayoría de los casos, con cierta proporción creciente de la forma química «2» en suelos con pH entre 4,8 a 5,2, indicando una mayor proporción adsorbida al suelo.

Rabuffetti y Deambrosi (2017) explican que el agua de la inundación al entrar al

suelo ocupa el espacio poroso, reduciendo el contenido de oxígeno a nulo entre uno a tres días posteriores. La disminución del contenido de oxígeno en el suelo al inundar es más drástica aún, cuando éste está seco, porque se promueve la oxidación de la materia orgánica que consume rápidamente el oxígeno disponible. Sin embargo, el agua de inundación encima de la superficie del suelo contiene oxígeno proveniente de la atmosfera. En los suelos inundados existe una capa con mayor presencia de oxígeno entre la superficie del suelo y un cm de profundidad, donde ocurren procesos de oxidación.

Las propiedades fisicoquímicas del suelo se modifican cuando éste se inunda. Por ejemplo, el pH desciende hasta un mínimo en los primeros días y se recupera posteriormente hasta alcanzar un valor comprendido entre 6,7 y 7,2, aproximadamente a las cuatro a seis semanas. En general, el pH aumenta con la inundación cuando se parte de un valor más ácido (excepto cuando el contenido de hierro es bajo) y disminuye hacia la neutralidad cuando se parte de un pH más elevado. Además, los suelos con alto contenido de materia orgánica y hierro reducible tienden a un pH de 6,5 de manera rápida, mientras que en los suelos ácidos con bajo contenido de materia orgánica y hierro, el pH crecerá muy lentamente y no superará el valor de 5, incluso aunque la inundación dure varios meses. Un alto contenido de materia orgánica contribuye a la caída rápida del pH, especialmente en los suelos sódicos y calcáreos, sin embargo, las temperaturas bajas y la presencia de nitratos disminuye la velocidad en el cambio en el pH (Rabuffetti y Deambrosi, 2017).

Otra propiedad fisicoquímica de interés es la concentración de iones o fuerza iónica en la solución de suelo. Rabuffetti y Deambrosi (2017) señalan que en los suelos ácidos y levemente ácidos ocurre la reducción de compuestos de hierro (Fe^{+3} a Fe^{+2}) y de manganeso (Mn^{+4} a Mn^{+2}) de formas insolubles a más solubles. Estos desplazan a otros cationes del complejo de intercambio, siendo los responsables del aumento de los cationes en

la solución del suelo; en cambio, en los suelos de pH neutro o levemente alcalinos, el calcio (Ca^{+2}) y el magnesio (Mg^{+2}) de la solución del suelo contribuyen significativamente a la fuerza iónica.

¿CÓMO SE COMPORTAN LOS RESIDUOS DE LAS IMIDAZOLINONAS EN EL PERFIL DEL SUELO INUNDADO?

Se detectaron distintos perfiles de distribución de los residuos remanentes del herbicida en la profundidad de suelo, según se haya realizado laboreo o siembra directa. Kraemer *et al.* (2009), trabajaron sobre suelo con y sin laboreo luego de dos arroces Clearfield (CL) seguido de un arroz no CL y determinaron luego de la cosecha de este último que el imazetapir lixivió hasta 20 cm de profundidad a los 540 días después de aplicado (DDA), alcanzando una concentración de $0,8 \mu\text{g}/\text{kg}$ ($0,8 \text{ ppb}$) (Figura 4). En la siembra convencional la concentración de este herbicida se distribuyó uniformemente hasta los 15 cm de profundidad en el perfil del suelo, mientras que bajo siembra directa la concentración en los primeros 5 cm fue menor que en la siembra convencional, acumulándose imazetapir entre los 5 a 15 cm.

En otra experiencia usando lisímetros, con un suelo típico de la Depresión Central, RS, sin historia de arroz CL, con $\text{pH } 4,8 \pm 0,2$ y una saturación en aluminio de $12,9 \pm 4,2\%$ en el perfil, Refatti *et al.* (2014) detectaron que al aumentar el pH del suelo a través del encalado se promovió una mayor disponibilidad de los residuos del imazetapir y el imazapic y a su vez mayor lixiviación en el perfil del suelo. Así como el herbicida se mueve hacia horizontes subsuperficiales acompañando el frente de humedecimiento durante los 90-100 días de inundación del arroz, Bundt *et al.* (2013) demostraron que la mezcla de imazetapir + imazapic también asciende con el agua por capilaridad. Este transporte es un proceso lento que no ocurre en el cultivo de arroz sino en el barbecho comprendido entre dos zafra consecutivas (150 días). La cantidad de residuos del herbicida que será transportado por este mecanismo dependerá de cuán cerca esté de la superficie la napa colgada y de la evaporación del agua desde el suelo.

Con la misma metodología, Bundt *et al.* (2015) detectaron que, en un suelo superficial seguido de una capa impermeable, como un horizonte B textural típico de la mayoría de los suelos arroceros, los residuos se acumularán por encima de

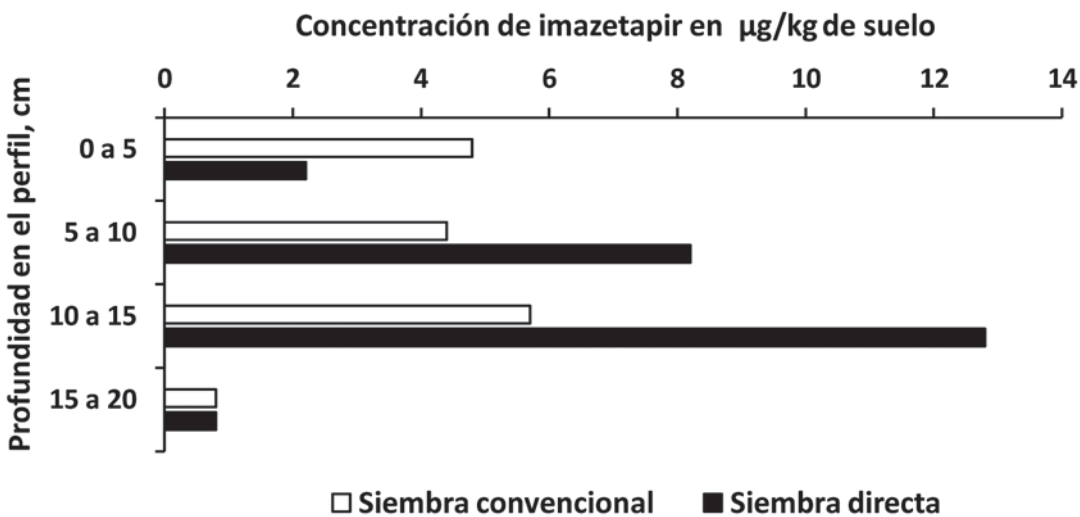


Figura 4. Distribución de la concentración de imazetapir ($\mu\text{g}/\text{kg}$) en los distintos horizontes en el perfil del suelo muestreado después de haber cultivado dos años seguidos arroz CL y un año arroz no CL bajo siembra convencional con laboreo y en siembra directa (adaptada de Kramer *et al.*, 2009).

esa capa siendo el daño mayor en el arroz no CL. Por el contrario, en un suelo con mayor espesor del horizonte superficial los residuos herbicidas lixiviarán durante la inundación, distribuyéndose en un mayor volumen de suelo por lo que bajará la concentración de los residuos redundando en un menor daño en el arroz no CL. Estos autores señalan que cuanto más espesor tengan los horizontes superficiales y subsuperficiales explorables por las raíces, se observarán síntomas de daño leves dada la menor absorción de residuos en las etapas iniciales de desarrollo del arroz no CL; en una etapa posterior cuando las raíces exploren los horizontes más profundos, se expresarán en mayor medida los síntomas de daño. Asumiendo que las raíces realmente absorban los residuos, la expresión de síntomas de daño y su severidad estarán en función del grado de desarrollo del cultivo, de la dilución que se haga de los residuos en la materia seca producida y de la capacidad de detoxificación. El 50% de los suelos donde se cultiva arroz en Río Grande del Sur tienen pH menor a 5, por

lo que se espera que una buena proporción de los residuos queden adsorbidos a los coloides del suelo persistiendo más tiempo y en consecuencia afectando a los cultivos susceptibles siguientes. La gran mayoría de los suelos donde se cultiva arroz son planosoles que desarrollan una napa colgada que está presente la mayor parte del año, siendo una característica que contribuye a la persistencia de los residuos de las imidazolinonas.

Saldain *et al.* (2014a) estudiaron la persistencia de los residuos de la mezcla de imazapir + imazapic en el suelo de la secuencia arroz CL seguido de raigrás sembrado al voleo sobre el rastrojo de arroz CL y posteriormente por arroz no CL en siembra directa. Para contextualizar, se asume que la inundación es de 90-100 días en el cultivo de arroz y la siembra de especies forrajeras sobre el rastrojo comienza un poco antes de los 120 días después de la aplicación (DDA). Entre este momento y los 180 DDA es cuando las plántulas de las especies forrajeras se implantarán y realizarán su crecimiento inicial, mientras que alrededor de los 300

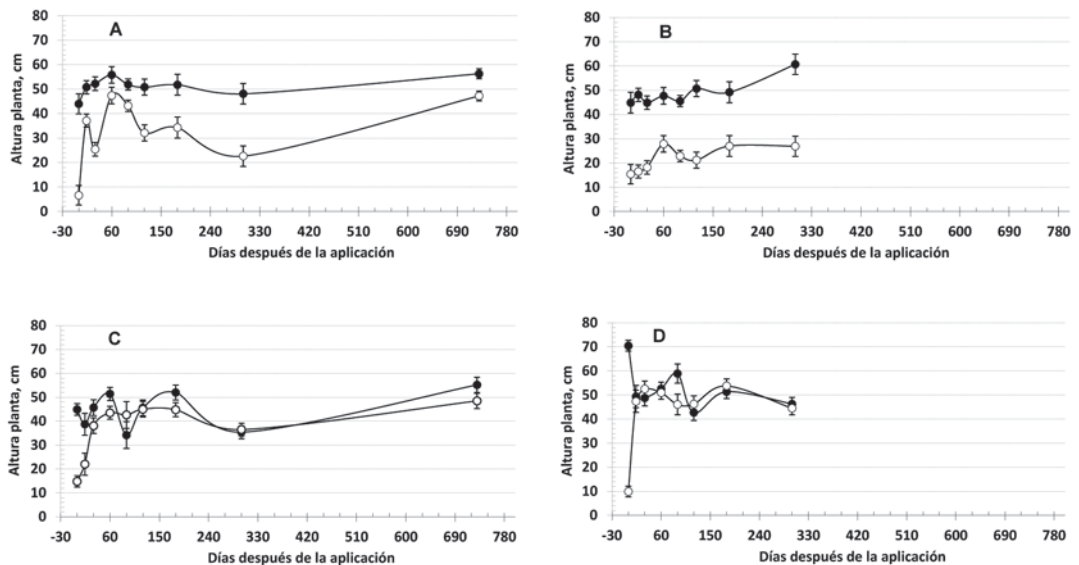


Figura 5. Altura de la planta del sorgo forrajero (cm) a las 4SDS de los tratamientos (●) sin imazapir + imazapic y (○) con 110 + 37 g a.e./ha de imazapir + imazapic correspondiente a los muestreos en el horizonte de 0-10 cm estudiados en función del sitio y del año de recolección. A: Río Branco 2008-2009; B: Río Branco 2009-2010; C: UEPL 2008-2009; D: UEPL 2009-2010. Los círculos representan la media \pm error estándar ($n=6$), 4SDS=cuatro semanas después de la siembra, UEPL=Unidad Experimental Paso de La Laguna, Treinta y Tres.

DDA, se comenzará a sembrar arroz no CL, soja y sorgo.

Se monitoreó la presencia de los residuos en el suelo de las parcelas que no habían sido tratadas con imidazolinonas y las tratadas con 110 + 37 g a.e./ha de imazapir + imazapic en el cultivo del arroz CL y el barbecho posterior, con un bioensayo sembrando sorgo forrajero como especie indicadora. En general, se observó que las máximas diferencias de altura de la planta de sorgo forrajero ocurrieron entre los tratamientos en las fechas de muestreo más cercanas a la aplicación de la mezcla imazapir + imazapic en postemergencia temprana (Figura 5), registrándose muerte de plántulas en ese momento y a los 14 días DDA, en ambos suelos.

En el horizonte de 0-10 cm, las diferencias significativas observadas en la altura en todos los momentos muestreados indican que existieron residuos disponibles y con actividad biológica en ambos años en Río Branco (Figuras 5A y 5B). Sin embargo, se aprecia una fase rápida de disipación de los residuos atento al creci-

miento del sorgo forrajero y después habría más disponibilidad de residuos entre 120 y 180 DDA; algo más aumentaría a los 300 DDA probablemente por el ascenso de residuos en la entre zafrá en el año 2008-2009, mientras que la fase rápida es mucho menos pronunciada en el año 2009-2010. En cambio, el comportamiento de los residuos es bien contrastante con aquellos en la UEPL (Figuras 5C y 5D). Se observaron diferencias en altura significativas entre el día de la aplicación y los 60 DDA, y puntualmente a los 180 DDA en el año 2008-2009, mientras que los residuos se disiparon muy rápido en el año 2009-2010, dado que se apreciaron diferencias significativas en el día de la aplicación y a los 90 DDA. Además, en ambos sitios se evaluó la persistencia hasta los 730 DDA en el año 2008-2009, constatándose que persisten siendo la diferencia de altura escasa, lo que indicaría que es una concentración de residuos muy pequeña en Río Branco y despreciable en la UEPL.

En el horizonte de 10-20 cm (Figura 6), se observa una reducción significativa en el crecimiento de la planta de sorgo forrajero a

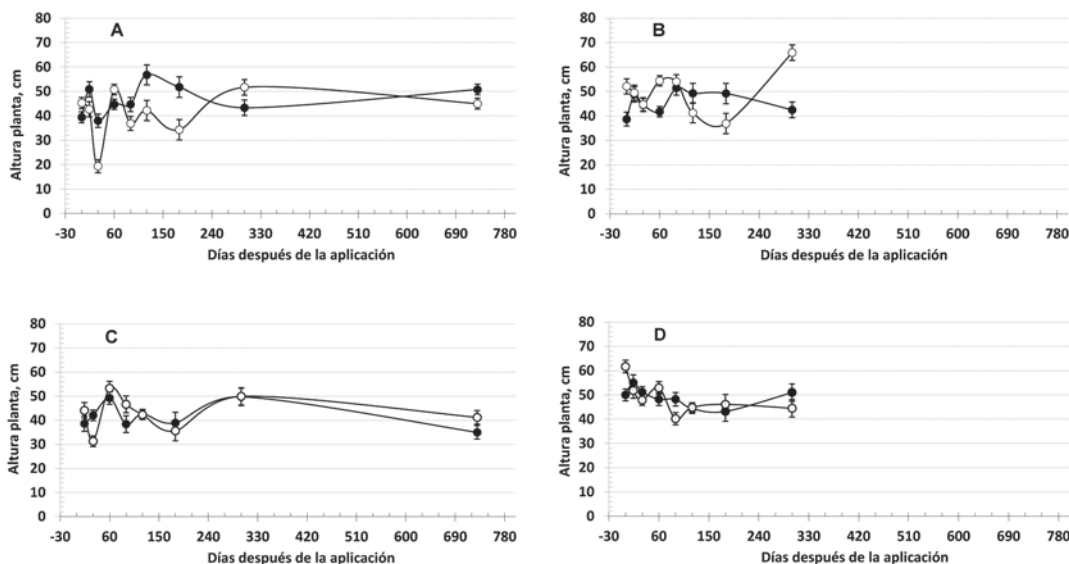


Figura 6. Altura de la planta del sorgo forrajero (cm) a las 5SDS de los tratamientos (●) sin imazapir + imazapic y (○) con 110 + 37 g a.e./ha de imazapir + imazapic correspondiente a los muestreos de 10-20 cm estudiados en función del sitio y año de recolección. A: Río Branco 2008-2009; B: Río Branco 2009-2010; C: UEPL 2008-2009; D: UEPL 2009-2010. Los círculos representan la media ± error estándar (n=6), 5SDS=cinco semanas después de la siembra, UEPL=Unidad Experimental Paso de La Laguna, Treinta y Tres.

los 120 y 180 DDA, indicando la presencia de residuos asociada a la lixiviación que promueve el frente de humedecimiento cuando avanza la inundación en los suelos de Río Branco (Figuras 6A y 6B), mientras que no se detectó inhibición en el horizonte subsuperficial del suelo de la UEPL (Figuras 6 C y 6D). A los 300 DDA, tampoco se detectó inhibición en la altura de la planta indicadora en ninguno de los sitios.

DISIPACIÓN DE LOS RESIDUOS DE LAS IMIDAZOLINONAS EN EL AGUA DE RIEGO

En general la disipación de las imidazolinonas en el agua y suelo está basada en mecanismos que pueden operar en ambas matrices o que pueden actuar preferentemente en una u otra. En consecuencia, la eficacia de los mecanismos involucrados en la disipación de los residuos determinará la persistencia de éstos (Ramezani, 2007). Las imidazolinonas son herbicidas cuyas moléculas no son simétricas porque su estructura no se superpone a su imagen especular (herbicidas quirales). Gehrke *et al.* (2021) explicaron que un átomo de carbono ubicado en la posición 4 en el anillo del grupo imidazolinona es asimétrico. Por lo tanto, presenta cuatro enlaces distintos provocando variaciones en la molécula denominadas enantiómeros ópticos, que tienen las mismas propiedades físicas y químicas. Este hecho hace que el compuesto se presente bajo forma de R-enantiómeros y L-enantiómeros según hacia donde desvían la luz incidente. Ramezani (2007) agregó que los mecanismos de disipación de estos herbicidas a través de la degradación microbiana y la catálisis enzimática del suelo podrían tener preferencia por un enantiómero dejando al otro sin modificarse, con la consiguiente acumulación e impacto en el ambiente. Se ha demostrado que el R-enantiómero del imazapir tiene más capacidad inhibitoria que el L-enantiómero (Hsiao *et al.*, 2014). Generalmente, las formulaciones de herbicidas quirales se presentan como una mezcla racémica, componiéndose la mezcla por 50% de

cada enantiómero debido a lo costoso de la separación del enantiómero de menor actividad herbicida (Ramezani, 2007). Estos autores mencionaron que los pesticidas que presentan radicales carboxilos (COOH) tienden a tener degradación por hidrólisis. No obstante, encontraron que tanto imazaquín, imazetapir, así como el imazapir presentaron una degradación despreciable por hidrólisis en solución acuosa ajustadas a distintos pH.

Otro mecanismo de disipación estudiado fue la fotólisis o foto degradación en solución acuosa debido a la fracción ultravioleta (UV) de la radiación solar que deriva los residuos en otros compuestos sin actividad herbicida. Ramezani (2007) trabajó al inicio del uso de las imidazolinonas en colza en el sur de Australia, zona ubicada en una latitud similar a la de Uruguay, donde la incidencia de la radiación ultravioleta (UV) es alta a muy alta entre noviembre y marzo. En condiciones de campo, la vida media en el agua puede estar afectada por el pH, el contenido de carbono orgánico y la temperatura, siendo la magnitud del efecto específico para cada compuesto. El imazapir aumentó su vida media en el agua en 1,8 días con la presencia de ácidos húmicos en una relación 1:1 (imazapir: ácidos húmicos) comparado con aquella en el agua destilada (9,8 días), mientras que el imazetapir necesitó más concentración de ácidos húmicos para alargar significativamente la vida media. Los autores señalan que los ácidos húmicos tienen la capacidad de absorber la radiación ultravioleta actuando como una pantalla solar protegiendo al herbicida considerado (Ramezani *et al.*, 2008). Otros autores reportaron vidas medias en soluciones acuosas (agua destilada) de 1,3 a 2,3 días; 3 a 4,5 horas y 57 horas para el imazapir, imazapic y el imazetapir, respectivamente (Mallipudi *et al.*, 1991; Mangels, 1991; Harir *et al.*, 2007; Espy *et al.*, 2011). La vida media del imazapic en medio acuoso se redujo de 3 h 30 min a 2 h 5 min con un aumento de la temperatura de 30 a 40 °C (Espy *et al.*, 2011). En general en estos herbicidas la tasa de disipación en el agua no cambia

con el pH mayor a 5, manteniéndose la vida media específica. Los días más frescos, con menor intensidad de luz por nubes de gran espesor y mayor contenido de carbono orgánico natural en el agua, prolongan la vida media de estos herbicidas (Espy *et al.*, 2011); además, la turbidez del agua opera de manera similar (Ramezani *et al.*, 2008; Avila *et al.*, 2006).

En condiciones de campo en Uruguay, Umpiérrez *et al.* (2014) monitorearon la evolución de la concentración de residuos de imazapir e imazapic en el agua de riego a partir del primer día después de la inundación (DDI) hasta los 42 DDI en las parcelas tratadas con 110 + 37 g a.e. /ha en postemergencia (Tablas 1 y 2). En Río Branco, no se detectó imazapir en el año 2008-2009, persistiendo hasta los 7 DDI en el año 2009-2010, mientras que se encontró imazapic a los 1 y 35 DDI para el año 2008-2009 y 2009-2010, respectivamente. En la UEPL, se disipó rápidamente el imazapir ya que se detectó únicamente en 1 DDI en el año 2007-2008 mientras que la persistencia del imazapic fue de 42, 28 y 14 DDI para los años 2007-2008, 2008-2009 y 2009-2010, respectivamente. El imazapir se disipó más rápidamente en el agua de

inundación sobre el suelo franco limoso de la UEPL que sobre el agua en el suelo franco a franco arenoso de Río Branco. En cambio, el imazapic persistió más, aunque fue más variable, mostrando una persistencia media de 24 ± 17 días estando alineados con aquellos de $23,5 \pm 11,2$ días obtenidos por Zanella *et al.* (2011). Estos datos son muy importantes para evitar drenar antes de ese período y reducir el transporte de agua con residuos de las imidazolinonas a las aguas superficiales. El límite de cuantificación del equipamiento (LOQ) no permitió estimar concentraciones inferiores a 10 µg/L por lo que no se pudo calcular la vida media. Zanella *et al.* (2011) encontraron que la vida media del imazapic fue $10,6 \pm 5,1$ días y para el imazetapir fue $4,4 \pm 1,9$ días en el agua de inundación. Schreiber *et al.* (2017) determinaron que la vida media del imazapic y del imazapir fueron de 3, 5 y 6 y 11 días para las parcelas regadas por inundación continua y para aquellas regadas con inundación intermitente, respectivamente.

Al comienzo del uso del arroz CL, existía la inquietud entre técnicos y productores sobre qué pasaba si escapes de agua de inundación de una chacra con arroz CL entraban en una chacra sembrada con

Tabla 1. Evolución de la concentración (µg/l, ppb) del imazapir e imazapic en el agua de inundación del arroz Clearfield®. Río Branco, 2008-2009 y 2009-2010.

Año DDI	2008-2009		2009-2010	
	imazapir	imazapic	imazapir	imazapic
1	nd	<10 ^(2/3)	<10	nd
3	nd	nd	<10	nd
7	nd	nd	<10 ^(2/3)	nd
14	nd	nd	nd	<10
21	nd	nd	nd	17,5 ^(1/3) y <10 ^(1/3)
28	nd	nd	nd	<10 ^(1/3)
35	*	*	nd	<10 ^(1/3)
42	*	*	nd	nd

DDI=días después de la inundación, *=precipitaciones mayores a 100 mm/día que provocaron desborde del agua, nd=no detectado, ()=entre paréntesis número de muestras con la concentración de residuos detectada en tres repeticiones. LOD (Límite de Detección) = 1 µg/l. LOQ (Límite de Cuantificación o Concentración) = 10 µg/l.

Tabla 2. Evolución de la concentración ($\mu\text{g/L}$, ppb) de los principios activos imazapir e imazapic en el agua de inundación del arroz Clearfield®. UEPL, 2007-2008, 2008-2009 y 2009-2010.

Año DDI	2007-2008		2008-2009		2009-2010	
	imazapir	imazapic	imazapir	imazapic	imazapir	imazapic
1	<10	<10 ^(2/3)	nd	<10 ^(1/3)	nd	78,5
3	nd	nd	nd	nd	nd	56,3
7	nd	<10 ^(2/3)	nd	<10 ^(1/3)	nd	<10 ^(1/3)
14	nd	nd	nd	nd	nd	<10 ^(1/3)
21	nd	nd	nd	nd	nd	nd
28	nd	nd	nd	<10 ^(1/3)	nd	nd
35	nd	nd	nd	nd	nd	nd
42	nd	<10 ^(2/3)	nd	nd	nd	nd

DDI=días después de la inundación, nd=no detectado, () =entre paréntesis número de muestras con la concentración de residuos detectada en tres repeticiones. LOD (Límite de Detección) = 1 $\mu\text{g/l}$, LOQ (Límite de Cuantificación o Concentración) = 10 $\mu\text{g/l}$

otra variedad de arroz no CL. De modo que, en cada momento de colecta de agua para la determinación analítica de residuos, se colectó un duplicado para valorar si los residuos presentes afectaban el crecimiento de la plántula de la variedad El Paso 144. Se evaluó por medio de un bioensayo con semillas y no se detectó ningún efecto adverso tanto en el largo de las raíces y su forma, así como en el largo de la parte área de las plántulas (Saldain *et al.*, 2015).

DISIPACIÓN DE LAS IMIDAZOLINONAS EN EL SUELO

Helling (2005) valoró que la ventaja económica principal del uso de herbicidas residuales es la obtención de un control de malezas más prolongado en el tiempo para un cultivo. Este hecho beneficioso para el agricultor tiene dos contrapesos a considerar: el efecto de los residuos con actividad biológica sobre los cultivos siguientes en la rotación, y el transporte de residuos por el agua de lluvia hacia aguas superficiales o subterráneas (acuíferos). Este último aspecto, sí bien es de interés, especialmente para suelos agrícolas no arroceros ubicados en la zona de recarga de acuíferos locales,

no será abordado atento a que escapa al objetivo de esta publicación. Por otro lado, tampoco se incluye el tema de la volatilización ya que se considera despreciable, según Shaner (2014).

Respecto a los mecanismos de disipación como la degradación microbiana y la foto degradación, son muy relevantes para reducir la cantidad de los residuos de herbicidas en el suelo para un contexto del cultivo de arroz y sus rotaciones. Los factores que regulan la adsorción y la desorción de los residuos a los coloides del suelo determinarán la cantidad disponible de residuos en la solución de este para que operen los procesos de disipación. Entre estos factores se encuentran el pH del suelo, contenido de materia orgánica y humedad del suelo, la temperatura y en sentido amplio la textura, incluyéndose la composición mineral del suelo (Helling, 2005).

Trabajando con ocho suelos diferentes, Wang y Liu (1999) determinaron que el porcentaje de imazapir adsorbido a los coloides del suelo aumenta con la temperatura, sugiriendo que es un fenómeno endotérmico. Constataron, además, que aumentó con el contenido de materia orgánica y con la reducción en el pH del suelo. En cuanto a la desorción del imazapir, encontraron un

coeficiente de correlación de -0,971 con el contenido de materia orgánica indicando que a menor materia orgánica más cantidad de imazapir será desorbido y estará disponible en la solución del suelo. En suelos arroceros tropicales con pH entre 5,2 a 6,4, Yavari *et al.* (2020) asociaron la mayor adsorción del imazapic y el imazapir a los mayores contenidos de carbono orgánico y de arcilla, y una fuerte correlación negativa entre los contenidos de carbono orgánico y de arcilla y la cantidad de imazapic e imazapir desorbido, en concordancia con Wang y Liu (1999). Mangels (1991) destacó que el efecto de retención del imazetapir y del imazaquín aumenta con el alto contenido de materia orgánica o arcilla y es solamente significativo en suelos de pH bajos. En el mismo sentido, Gehrke *et al.* (2021) lo generalizan para las imidazolinonas y explica que el comportamiento es debido a que la fracción hidrofóbica de los coloides del suelo atraen al herbicida. Su *et al.* (2019) encontraron que la adsorción del imazapic fue muy significativa en un suelo con altos contenidos de arcilla y limo (69,1%). Los autores destacan que tanto la fracción arcilla como la fracción limo tienen mucha superficie de adsorción lo que aumenta su capacidad de retener al imazapic.

Helling (2005) señaló menor disponibilidad de los herbicidas en la solución cuando se reduce el contenido de agua en el suelo. Mangels (1991) sostiene que la alternancia de ciclos de secado y humedecimiento de corta duración aumentó la adsorción del imazapir. La mayor adsorción obtenida por el secado temporal fue atribuido a la reducción de la película de agua que rodea las partículas de suelo, lo cual concentra el herbicida cerca de la superficie de adsorción. Este fenómeno es maximizado cuando el suelo se seca hasta el 25% del contenido de agua correspondiente a capacidad de campo.

Gehrke *et al.* (2021) agruparon la vida media de las imidazolinonas según hubiesen sido determinadas en suelos esterilizados o en suelos sin esterilización, siendo mucho más corta en los últimos, destacán-

dose la relevancia de la degradación aeróbica debido a los microorganismos naturales del suelo como mecanismo de disipación.

Wang *et al.* (2006) estudiaron la degradación microbiana aeróbica y anaeróbica del imazapir en cuatro suelos bajo condiciones de oscuridad por 60 días. La degradación aeróbica por los microorganismos nativos ocurrió a una tasa constante para cada suelo durante el período considerado, habiéndose reducido la concentración del herbicida en 82% para un suelo de pH 5,3, y de 59% para un suelo de pH 8,8, siendo la vida media de 26 y 44 días, respectivamente. Los autores explican que la hidrólisis y la adsorción del imazapir es aumentada en suelos con pH bajos y podría explicar la disipación más completa observada en el suelo de pH menor. En cuanto a la degradación anaeróbica del imazapir observada se ajustó a un modelo de dos fases. Una fase rápida que mostraba una vida media de 10 días para el suelo de pH 5,3 y 4 días para el suelo de pH 8,8, mientras que la segunda fase era de disipación muy lenta. Los autores destacan que en promedio la degradación ocurrió seis veces más rápido en la fase inicial debido a la actividad de los microorganismos nativos en un ambiente anaeróbico y que solo detectaron un efecto leve del pH del suelo en la disipación. Sin embargo, Gehrke *et al.* (2021) señalan que existe un déficit de información sobre la persistencia y degradación anaeróbica de las imidazolinonas en las condiciones de un suelo bajo la producción de arroz, con inundación de forma permanente por 100 días. Como regla general se asume que en un ambiente anaeróbico la tasa de degradación de los herbicidas es más lenta, con algunas excepciones (Helling, 2005). En condiciones de campo, Junkes *et al.* (2019) determinaron que la vida media del imazapir fue de 182 días cuando se manejó la inundación continua y de 42 días cuando se usó la inundación intermitente en el cultivo de arroz. Para el imazapic no se estimó la vida media por falta de un ajuste del modelo en la inundación continua y fue de 96 días en la inundación intermitente. Además, observaron que la concentración de los residuos para ambos herbicidas a los

184 DDA quedaron por debajo del límite de detección en las parcelas con inundación intermitente.

Su *et al.* (2019) concluyeron que el imazapic se degrada principalmente por la acción de microorganismos aeróbicos nativos del suelo. Al aumentar la temperatura aumenta la población de microorganismos y su actividad acelerando la degradación. Esto se ve reflejado en la vida media del imazapic que pasó de 99 a 139 y 193 días cuando fue expuesto a 35, 25 y 15 °C, respectivamente. Con la humedad del suelo, se detectó un comportamiento similar. Cuando el suelo tiene poca humedad en torno al 15%, la vida media del imazapic fue de 231 días mientras que, con 90% de humedad la vida media se redujo a 96 días. Cuando se acoplan la temperatura y humedad adecuada, la degradación ocurre muy rápido siempre que haya oxígeno disponible. Este comportamiento también fue observado para imazaquín e imazetapir, con el agregado que por encima del 75% de la capacidad de campo tendía a disminuir la producción de $^{14}\text{CO}_2$ significando menor degradación aeróbica, especialmente en el imazetapir (Flint y Witt, 1997). Esta situación se puede presentar cuando se hace una aplicación preemergente y ocurren precipitaciones superiores a 30 mm o hay que bañar porque el suelo está seco. Ahí el herbicida se activa por la humedad y degrada rápidamente por la combinación con la temperatura elevada, reduciéndose la dosis en el suelo; por ende, el control de malezas es menor debido a la acción residual reducida del herbicida.

En los suelos estudiados, Su *et al.* (2019) encontraron que la tasa de degradación microbiana aeróbica del imazapic fue mayor en el suelo con pH de 8 que a pH de 7 y luego a pH 6. La vida media siguió el orden inverso con 139 días a pH de 8, 147 días a pH 7 y de 154 días a pH 6. El contenido de materia orgánica condicionó la tasa de degradación microbiana. Cuando estuvo entre valores de 0,55 a 1,0%, la vida media se ubicó en el rango de 139-128 días, mientras que cuando el contenido de la materia orgánica se situó en el rango de 2,5 a 4,0%, las correspondientes vidas medias fueron de 158 y 165 días, siendo mayores, lo que

según los autores indicaba una menor tasa de degradación microbiana. Contrariamente, Gehrke *et al.* (2021) señalaron que no detectaron una relación específica entre la degradación microbiana aeróbica y el contenido de materia orgánica, ya que si bien esta favorece mayor actividad microbiana también favorece una mayor adsorción.

Aichele y Penner (2005) realizaron estudios de adsorción y desorción en situaciones controladas en el tiempo, de los herbicidas imazamox, imazetapir e imazaquin. Detectaron que el porcentaje de herbicida marcado con carbono radioactivo ^{14}C encontrado en la solución del suelo fue en orden decreciente imazamox > imazetapir > imazaquín, siendo más elevada a pH 7 que a pH 5 para todos los herbicidas. En el caso particular del imazetapir una proporción más alta del herbicida retirado de los coloides (desorbido) fue obtenida a pH 7 que a pH 5, confirmándose información previa que establecía que a pH menores que 6, aumentaba la adsorción del imazetapir y del imazaquín.

El otro mecanismo de disipación de interés es la degradación abiótica debida a la radiación ultravioleta (UV) que ocurre en el suelo. Ramezani *et al.* (2008) evaluó la foto-degradación de las imidazolinonas en la superficie del suelo y constataron que ocurrió solamente en presencia de luz, siendo estos herbicidas estables en la oscuridad. Como estos herbicidas son estables a la hidrólisis, los autores adjudican a la foto-degradación el principal mecanismo de disipación de los herbicidas en esta situación. La tasa de degradación en la superficie del suelo fue más lenta que en el agua, presentando vidas medias mayores (Tabla 3). Las diferencias en la tasa de foto degradación en la superficie del suelo puede deberse a las diferencias en solubilidad en agua entre las tres imidazolinonas estudiadas. Dicha solubilidad es mayor para el imazapir > imazetapir > imazaquín y a mayor solubilidad en agua, mayor es la penetración en el suelo quedando fuera del alcance de la radiación solar. Existe evidencia de que la radiación solar alcanza una profundidad entre 0,2 y

Tabla 3. Cinética de la foto degradación del imazapir, imazetapir e imazaquín tanto en agua como en la superficie del suelo (n=3).

Herbicida	En agua deionizada		En superficie del suelo	
	k (/días)	t _{1/2} (días)	k (/días)	t _{1/2} (días)
Imazapir	0,075	9,1	0,022	30,9
Imazetapir	0,07	9,8	0,028	24,6
Imazaquín	0,369	1,8	0,045	15,3

k=tasa de foto degradación y t_{1/2}=vida media obtenidas del modelo de reacción de primer orden ajustado por Ramezani *et al.* (2008).

0,3 mm pudiendo llegar a más de 0,7 mm en un suelo secado al aire.

Este mecanismo de disipación actúa en el suelo cuando en las aplicaciones en preemergencia en el arroz CL el suelo esté seco y se demora en realizar un baño por una semana o 10 días. Si el suelo está seco y bañar es impostergable para que germine el arroz, se recomienda realizar la aplicación en preemergencia después del baño cuando el agua se resuma. Con humedad en el suelo y debido a la solubilidad alta del imazapir y la buena solubilidad del imazapic, quedarán bajo la superficie del suelo, no operando este mecanismo de disipación.

EFFECTO DE LAS IMIDAZOLINONAS EN LOS CULTIVOS SIGUIENTES

Susceptibilidad de las especies forrajeras a los residuos remanentes del imazapir + imazapic

La siembra de raigrás solo o una gramínea (raigrás o festuca) en mezcla con trébol blanco y lotus sobre el rastrojo de arroz, implica romper las taipas anticipadamente y

drenar la chacra para luego distribuir las semillas. De acuerdo con las últimas encuestas arroceras correspondientes al período 2015-2019 (DIEA), la siembra de pasturas sobre el rastrojo de arroz ha estado en el orden de las 53 mil ha, lo que representa un 58% del arroz de salida de cada año, entendido como aquel rastrojo que no retorna inmediatamente a la producción de arroz.

Cuando se evalúa la susceptibilidad de los cultivos siguientes a los residuos de los herbicidas hay que tener en cuenta varios factores, entre ellos el tipo de suelo (Tabla 4) y cómo interactúan la fecha de siembra, la especie forrajera y el nivel de residuos remanente generado a través de las dosis aplicadas en postemergencia (Tabla 5, Saldain *et al.*, sin publicar). En un planosol arenoso de Río Branco (RB), el raigrás sembrado una semana después de la cosecha (SDC) correspondiente a los 130 DDA, redujo la productividad ante la presencia creciente de residuos frente al testigo sin aplicación de imidazolinonas, mientras que no se detectó ninguna diferencia en la siembra a las 5 SDC (165 DDA). Los residuos remanentes debido a la dosis más

Tabla 4. Características del suelo utilizado en Río Branco y en la UEPL para la evaluación de la susceptibilidad de las distintas especies a los residuos de imazapir + imazapic en el suelo.

Sitio	Año siembra CL	Profundidad muestra	Características del suelo				
			pH	C.org. %	Arena %	Limo %	Arcilla %
Río Branco	2008-2009	0 - 10 cm	5,4	1	70	9	21
UEPL	2005-2006	0 - 10 cm	5,3	1,3	36	51	13

Análisis de suelos realizados en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua de INIA La Estanzuela. %M.O.=%C.org. x 1,72.

Tabla 5. Materia seca producida a los 180 días después de la siembra (DDS) sobre el rastrojo de arroz Clearfield por especies forrajeras seleccionadas en un suelo de Río Branco, 2008-2009.

Especie forrajera: Dosis de imazapir + imazapic g a.e./ha	Raigrás cv INIA Cetus		Lotus cv San Gabriel	
	Fecha de siembra 1 SDC kg/ha	5 SDC kg/ha	Fecha de siembra 1 SDC kg/ha	5 SDC kg/ha
0	3046 a	2239 a	507 a	2133 a
110 + 37	2069 b	1766 a	324 a	1949 a
220 + 74	1677 b	1971 a	242 a	1135 a

Las medias seguidas por la misma letra dentro de cada columna no difieren significativamente entre sí según la prueba de la Mínima Diferencia Significativa al 5%, SDC=semana(s) después de la cosecha. Tomado de Saldain *et al* (sin publicar).

baja del herbicida empleada permitieron que el raigrás sembrado 1 SDC produjera una cantidad de forraje similar a aquel sembrado a las 5 SDC. Se destaca que no existieron diferencias causadas por los residuos en la población inicial de plantas de raigrás ni en el peso seco de las mismas a los 90 DDS (datos no mostrados).

Pinto *et al.* (2009b) señalaron que en la sucesión con arroz CL el raigrás debe ser sembrado después de los 180 DDA para evitar efectos adversos, sin embargo, no presentó datos que avalen esa conclusión. En cambio, en el lotus si bien es superior

la productividad cuando se siembra 5 SDC comparado con 1 SDC (Tabla 5), no disminuyó significativamente la productividad por efecto de la persistencia de los residuos de imazapir + imazapic en el suelo en ninguna fecha de siembra. Por otro lado, en un suelo brunoso franco de la UEPL, donde se usó un rango de fecha de siembra más estrecho entre 1 SDC (145 DDA) y 3 SDC (160 DDA), los mismos tratamientos herbicidas no afectaron ninguna de las variables estudiadas (datos no mostrados), indicando que los residuos remanentes de los herbicidas fueron más bajos que en el suelo arenoso de RB.

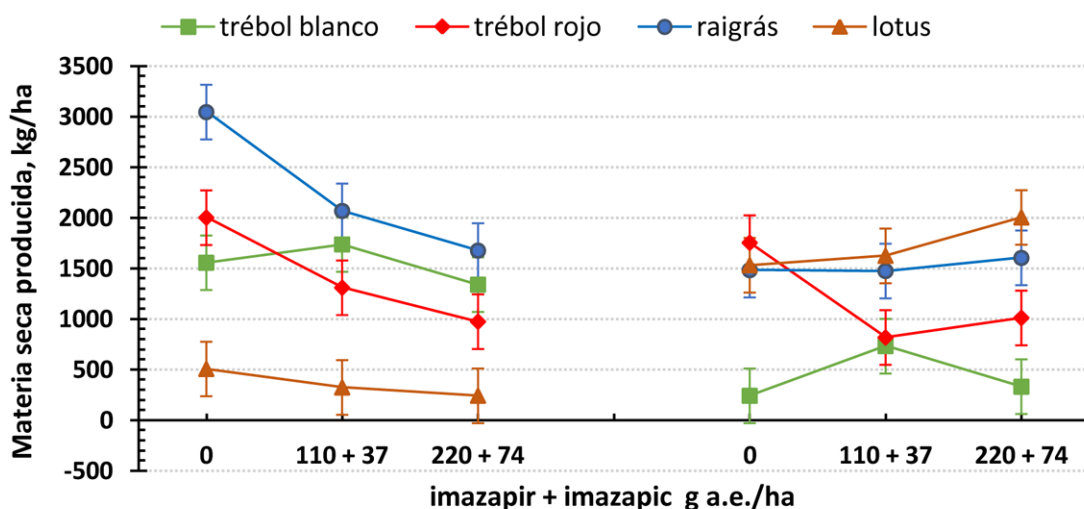


Figura 7. Materia seca producida (kg/ha) por cada especie forrajera a los 180 días después de la siembra sobre el rastrojo del arroz Clearfield con dosis crecientes de imazapir + imazapic en postemergencia aplicadas en el cultivo. Izq. Río Branco, 2008-2009, Der. Unidad Experimental Paso de La Laguna (UEPL), 2005-2006.

En el mismo suelo de RB, se evaluaron raigrás, trébol blanco, trébol rojo y lotus sembrados puros a la 1 SDC (130 DDA), mientras que en el suelo de la UEPL se estudiaron las mismas especies sembradas a 1 SDC (145 DDA). Saldain *et al.* (2012) observaron que las especies forrajeras evaluadas se implantaron bien y el crecimiento inicial a los 90 DDS transcurrió sin ser afectado por los residuos de los herbicidas (datos no mostrados). Sin embargo, la materia seca producida de forraje a los 180 DDS se redujo para el raigrás y el trébol rojo en el suelo de RB, pero no en el de UEPL (Figura 7). El trébol blanco, así como el lotus no fueron afectados en ninguno de los dos sitios. Aunque no se cuantificaron los residuos de imazapir + imazapic en los suelos, una misma dosis de herbicida en combinación con las condiciones ambientales después de la cosecha del arroz y las características del suelo generó aparentemente distintas cantidades de residuos disponibles para interferir con las especies sembradas.

A la dosis de etiqueta o mayores del imazetapir + imazapic, Pinto *et al.* (2009b) determinaron reducciones en la altura de la planta y la productividad del forraje producido por el raigrás. Los autores determinaron en un suelo planosol de Capao do Leao (RS) reducciones de la productividad de forraje del raigrás del orden de los 1788, 2456 y 3754 kg/ha con respecto al testigo sembrado después de uno, dos y tres años seguidos de arroz CL. Además, mencionan que en los planosoles francos de la Planicie Costera Externa, RS, los residuos del imazetapir + imazapic persisten en años con precipi-

taciones bajas en el invierno y primavera, pudiéndose acumular si se hace un uso repetido del arroz CL. Santos *et al.* (2014) confirmaron que la aplicación de imazetapir + imazapic o imazapir + imazapic con dosis de etiqueta o mayores afectaron la altura y productividad del raigrás siendo la última mezcla más persistente y fuerte el efecto en la forrajera.

Efecto de los residuos del imazapir + imazapic sobre la productividad inicial de la pastura

La rotación del arroz con pasturas sembradas compuesta de varias especies es una práctica común en el país, realizándose en alrededor de un 58% del rastrojo de arroz que se deja de cultivar. Saldain *et al.* (2014b) estudiaron cómo afectaban la productividad inicial de la pastura sembrada los distintos tratamientos de imazapir + imazapic y el manejo del riego en el arroz CL, sobre un suelo solod de la UEPL (Tabla 6). La pastura sembrada fue la mezcla estándar usada de raigrás, trébol blanco y lotus.

Se detectó una interacción significativa entre el año de siembra del arroz y los tratamientos de herbicida en la producción de forraje de la mezcla de especies a los 180 DDS. Se destaca el hecho de que 147 + 49 g a.e./ha de imazapir + imazapic redujo significativamente la productividad de forraje frente al testigo sin aplicación en el año 2005-2006 y frente al tratamiento recomendado donde se aplica la mitad de la dosis en preemergencia y la otra mitad en postemergencia. Este hecho no ocurrió en el año 2008-2009 y

Tabla 6. Características fisicoquímicas y textura del solod melánico en los distintos sitios de la Unidad Experimental Paso de La Laguna (UEPL).

Año siembra CL	Características del suelo					Clase textural
	pH	C.org. %	Arena %	Limo %	Arcilla %	
2005-2006	5,6	1,06	36	51	13	limo arenoso
2006-2007	6,4	0,91	26	45	29	franca
2008-2009	5,4	1,88	28	45	27	franca

Análisis de suelos realizados en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua de INIA La Estanzuela. %M.O.=%C.org. x 1,72.

Tabla 7. Materia seca producida por la pradera a los 180 días después de la siembra debido a la interacción año por tratamiento herbicida en la Unidad Experimental Paso de La Laguna (UEPL).

Año siembra CL	Dosis de imazapir + imazapic, g a.e./ha				
	0 kg/ha	73,5 + 24,5*	110 + 37 kg/ha	147 + 49 kg/ha	73,5 + 24,5/73,5 + 24,5** kg/ha
2005-2006	3073 a	2725 b	2838 a	2769 b	2819 a
2006-2007	974 c	1094 bc	1467 a	1311 ab	1022 bc
2008-2009	2958 a	2860 a	2762 a	2722 a	2995 a

*=tratamientos aplicados en postemergencia temprana, **=tratamientos aplicados en preemergencia seguida de aplicación en postemergencia temprana. Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente según la prueba de la Mínima Diferencia Significativa (MDS) al 5% dentro de la misma fila (año).

Tabla 8. Materia seca producida por las malezas a los 180 días después de la siembra debido a la interacción año por tratamiento herbicida en la Unidad Experimental Paso de La Laguna (UEPL).

Año siembra CL	Dosis de imazapir + imazapic, g a.e./ha				
	0 kg/ha	73,5 + 24,5*	110 + 37 kg/ha	147 + 49 kg/ha	73,5 + 24,5/73,5 + 24,5** kg/ha
2005-2006	424 a	425 a	350 b	340 b	330 b
2006-2007	77 a	66 a	48 a	105 a	47 a
2008-2009	2 a	0 a	31 a	5 a	9 a

*=tratamientos aplicados en postemergencia temprana, **=tratamientos aplicados en preemergencia seguida de aplicación en postemergencia temprana. Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente según la prueba de la Mínima Diferencia Significativa (MDS) al 5% dentro de la misma fila (año).

tampoco en el 2006-2007 (Tabla 7). En el año 2005-2006, se aprecia un efecto de control de las malezas en las parcelas tratadas a partir de la dosis de 110 + 37 g a.e./ha o mayor, y contrariamente, la presencia de malezas fue muy escasa en el año 2008-2009 (Tabla 8). Además, se comprobó que aplicar la dosis de 147 + 49 g a.e./ha en postemergencia temprana o dividirla en preemergencia y postemergencia temprana, redujo significativamente la producción de materia seca de las malezas, siendo menor que en testigo en el año 2005-2006 y que no se repite en los otros años. El año 2006-2007, la producción de forraje fue mucho menor que en los otros años debido a ausencia de precipitaciones en la primavera y las diferencias observadas no se asociaron al crecimiento de las malezas presentes en las parcelas.

Otra interacción significativa encontrada para la producción de forraje en la mezcla

de especies sembradas fue entre años de siembra del arroz CL y el manejo del riego. Sin embargo, esta interacción no fue relevante para la presencia de malezas (datos no mostrados). En los manejos del riego que incluyeron inundación a los 3 y 7 días después de la aplicación (DDA) o baños semanales antes de la inundación a los 21 DDA, se redujo significativamente la productividad de la pastura comparada con la inundación a los 21 DDA sin baños semanales en el año 2005-2006, sin embargo, este hecho no se presentó en los otros años evaluados (Tabla 9). Ese año fue el que llovió menos antes de la inundación a los 21 DDA, 23,5 mm/día a los 6 DDA, mientras los otros años presentaron precipitaciones de 50 mm/día a los 2 DDA y 43 mm/día a los 8 DDA para los años 2006-2007 y 2008-2009, respectivamente. En el 2005-2006, los tratamientos con inundación temprana y el hecho de bañar cada semana antes de la inundación a los 21

Tabla 9. Materia seca producida por la pradera a los 180 días después de la siembra debido a la interacción año por manejo del riego en la Unidad Experimental Paso de La Laguna (UEPL).

Manejo del riego Año siembra CL	Inundación, días después de la aplicación (DDA)			
	3 DDA kg/ha	7 DDA kg/ha	21 DDA c/baños* kg/ha	21 DDA s/baños** kg/ha
2005-2006	2517 b	2287 b	2871 b	3652 a
2006-2007	1215 a	1134 a	1202 a	1144 a
2008-2009	2870 a	2983 a	2958 a	2625 a

*=con baños semanales previo a la inundación, **=sin baños semanales previo a la inundación. Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente según la prueba de la Mínima Diferencia Significativa (MDS) al 5% dentro de la misma fila (año).

DDA contribuyó a preservar el herbicida en el suelo retardando la disipación, quedando un remanente de residuos en suelo para afectar al raigrás, la especie más susceptible de las utilizadas. A los 21 DDA sin baños semanales, si bien no se determinó que mecanismos de disipación operaron, probablemente, la foto degradación en la superficie del suelo y la degradación microbiana contribuyeron a que existieran menos residuos remanentes.

En el arroz CL del año 2008-2009 en un suelo de RB (Tabla 4), se instalaron parcelas con la mezcla forrajera comentada con anterioridad, a 1 y 5 SDC. La producción de forraje a los 180 DDS para el tratamiento de 110 + 37 g a.e./ha de imazapir + imazapic no fue significativamente menor a la del testigo sin aplicación de imidazolinonas, en cambio, la dosis doble evaluada redujo la productividad (Tabla 10).

Este hecho mostró que la siembra de una especie susceptible como el raigrás en

mezcla con dos especies tolerantes a los residuos del imazapir + imazapic como el trébol blanco y el lotus, favorece a la productividad de la mezcla cuando está presente un nivel intermedio de residuos en el suelo. Con un nivel más alto, la producción inicial de forraje se reduce alrededor de un 20%. Souto *et al.* (2013) destacaron que el suelo con vegetación respira más que el suelo sin vegetación y que el suelo de la rizosfera proveniente de leguminosas presentó más actividad respiratoria que aquel del raigrás y el arroz CL. La combinación de trébol blanco + lotus y la soja, entre otras especies evaluadas, estimularon la tasa de degradación de la población microbiana nativa metabolizando en promedio un 91, 92 y 93% del imazetapir, imazapic e imazapir agregado al suelo de rizosfera bajo condiciones ideales de temperatura y humedad, respectivamente. También, cuando se duplicó la dosis de etiqueta del imazetapir y el imazapic en el suelo de la rizosfera del

Tabla 10. Materia seca producida por las especies a los 180 días después de la siembra (DDS) promedio de siembra a 1 y 5 SDC de la pradera con dosis de imazapir + imazapic. Río Branco, 2008-2009.

Dosis de imazapir + imazapic g a.e./ha	Materia seca producida a los 180 DDS kg/ha
0	1878 a
110 + 37	1879 a
220 +74	1498 b

SDC=semanas después de la cosecha. Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente según la prueba de la Mínima Diferencia Significativa (MDS) al 5% dentro.

raigrás, trébol blanco + lotus y de la soja aumentaron la tasa de respiración. Sin embargo, para el imazapir al duplicar la dosis, la respiración del suelo de rizosfera disminuyó para las especies mencionadas. Ese hecho indica que el imazapir fue más tóxico para las poblaciones microbianas nativas que las otras imidazolinonas evaluadas.

Efecto de los residuos del imazapir + imazapic en la secuencia arroz CL, raigrás, arroz no CL y/o sorgo forrajero bajo siembra directa

Saldain *et al.* (2014c) condujeron esta secuencia de cultivos en un suelo plano-sol de RB y en un solod de la UEPL en

años consecutivos con ensayos independientes (Tabla 11).

En RB, se observa la existencia de residuos remanentes con actividad biológica a los 120 y 180 DDA tanto en el horizonte superficial como en el subsuperficial (Figuras 5A y 6A). En este sitio la siembra del raigrás fue realizada a los 140 DDA lo que indica que el raigrás creció absorbiendo residuos disponibles en la solución del suelo. Sin embargo, en la UEPL se detectaron solamente residuos con actividad biológica a los 180 DDA en el horizonte superficial pero no en el subsuperficial (Figuras 5C y 6C). El raigrás fue sembrado a los 149 DDA lo que indica que absorbió los residuos disponibles provocando la respuesta obtenida.

Tabla 11. Características de los suelos usados para los estudios de secuencia de cultivos.

Sitio	Profundidad muestra	pH	Características del suelo			
			Año siembra CL	C.org. %	Arena %	Limo %
Río Branco						
2008 - 2009	0 - 10 cm	5,6 ± 0,1	1,2 ± 0,1	47 ± 1	32 ± 2	21 ± 2
	10 - 20 cm	5,9 ± 0,1	0,7 ± 0,1	50 ± 4	29 ± 1	21 ± 3
2009 - 2010	0 - 10 cm	5,4 ± 0,1	0,8 ± 0,2	49 ± 3	34 ± 1	17 ± 3
	10 - 20 cm	5,8 ± 0,2	0,6 ± 0,1	49 ± 4	33 ± 2	19 ± 4
UEPL						
2008 - 2009	0 - 10 cm	5,4 ± 0,1	1,8 ± 0,1	30 ± 2	46 ± 3	24 ± 1
	10 - 20 cm	6,1 ± 0,1	1,1 ± 0,1	29 ± 3	43 ± 3	27 ± 1
2009 - 2010	0 - 10 cm	5,2 ± 0,1	1,0 ± 0,2	27 ± 1	46 ± 2	26 ± 1
	10 - 20 cm	5,6 ± 0,2	1,3 ± 0,3	27 ± 1	45 ± 1	28 ± 1

Análisis de suelos realizados en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua de INIA La Estanzuela. %M.O.=%C.org. x 1,72.

Tabla 12. Resultados promedios obtenidos para densidad y crecimiento inicial de las plantas a los 90 días después de la siembra (DDS) y altura de la planta al corte del raigrás cv. LE 284 respecto a las dosis de imazapir + imazapic en ambos sitios evaluados.

Imazapir + imazapic g a.e./ha	Población		Tamaño planta (peso seco)		Altura planta al corte	
	UEPL ¹	Río Branco ²	UEPL	Río Branco	UEPL	Río Branco
	plantas/m ²	plantas/m ²	g/10 plantas	g/10 plantas	cm/planta	cm/planta
0	401	466	2,3	2,1	73	82 a
110 + 37	349	475	2,8	1,4	71	75 b
220 + 74	394	497	2,8	1,8	70	73 b

¹=Medias de tres ensayos independientes conducidos en la Unidad Experimental Paso de La Laguna.

²=Medias de dos ensayos independientes conducidos en el año 2008-2009, no se evaluó el ensayo del 2009-2010. Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente según la prueba de la Mínima Diferencia Significativa (MDS) al 5% dentro de la misma columna..

Tabla 13. Productividad del raigrás cv. LE 284 a los 180 después de la siembra debido a la interacción entre las dosis de imazapir + imazapic y el año de siembra arroz CL/sitio.

Imazapir + imazapic g a.e./ha	Unidad Experimental Paso de La Laguna (UEPL)			Río Branco
	2007-2008 kg/ha	2008-2009 kg/ha	2009-2010 kg/ha	2008-2009 ¹ kg/ha
0	1043 a	3281 a	1866 a	3797 a
110 + 37	921 a	2571 b	2146 a	2932 b
220 + 74	1085 a	2692 b	2248 a	2918 b

¹=Medias corresponden a dos ensayos independientes y contiguos en 2008-2009. Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente según la prueba de la Mínima Diferencia Significativa (MDS) al 5% dentro de la misma columna.

Esta respuesta contrastó con la ausencia de reducción de la producción de forraje en el raigrás sembrado a los 131 DDA en el año 2009-2010, donde no se detectaron residuos remanentes con actividad biológica (Figuras 5D y 6D). Esto indicaría que probablemente existieron condiciones de menores precipitaciones y temperaturas más bajas durante el crecimiento del raigrás que favorecieron la persistencia de los re-

siduos del herbicida en ambos sitios en el año 2008-2009.

Dos meses antes de la siembra del arroz no CL y del sorgo forrajero se finalizó el raigrás, sembrándose directamente en el rastrojo muerto y seco. No se detectaron interacciones entre las dosis del herbicida y el año de siembra arroz CL/sitio, ni de las dosis evaluadas de imazapir + imazapic para el arroz no CL o

Tabla 14. Resultados obtenidos con El Paso 144 en la Unidad Experimental Paso de La Laguna (UEPL) y con INIA Olimar en Río Branco.

Imazapir + imazapic g a.e./ha	Población plantas		Población panojas		Altura planta cosecha		Rendimiento arroz	
	UEPL ¹	Río Branco ²	UEPL	Río Branco	UEPL	Río Branco	UEPL	Río Branco
	plantas/m ²		panojas/m ²		cm/planta		kg/ha	
0	178 a	243 a	510 a	558 a	80 a	73 a	6442 a	5654 a
110 + 37	202 a	257 a	522 a	581 a	82 a	72 a	7128 a	5511 a
220 + 74	186 a	240 a	487 a	533 a	82 a	73 a	6735 a	5275 a

¹=Promedio de tres ensayos en 2007-2008, 2008-2009 y 2009-2010.

²=Promedio de dos ensayos en 2008-2009 y 2009-2010. Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente entre sí según la prueba de Tukey al 5%.

Tabla 15. Efecto de la mezcla de imazetapir + imazapic asperjada en IRGA 422 CL en el año 2004-2005 en el cultivo siguiente de IRGA 417 sembrado a los 371 días después de la aplicación. Santa María, 2005-2006.

Imazetapir + imazapic g a.e./ha	Población de plantas plantas/m ²	Macollaje ^E tallos/planta	Población de panojas panojas/m ²	Tamaño panoja granos/panoja	Peso de 1000 granos, g	Rendimiento arroz kg/ha
0	295 a	4,5 a	648 a	79 a	27 a	8928 a
52,5+17,5 ^A // 52,5+17,5 ^B	191 b	1,8 b	358 b	73 b	23 b	5262 b
70 + 25 ^C	199 b	1,6 b	338 b	72 b	22 b	3989 b
70 + 25 ^D	171 b	1,5 b	303 b	71 b	23 b	4158 b

^A=preemergencia seguida por ^B=postemergencia, ^C=solo en preemergencia, ^D=solo en postemergencia, ^E=registrado a los 29 días después de la emergencia (DDE). Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente entre sí según la prueba de Tukey al 5%. Adaptado de Marchesan *et al.*, 2010.

para el sorgo forrajero siguientes (Tablas 14 y 15). La siembra de El Paso 144 fue realizada a los 333, 342 y 328 DDA en la UEPL, y para INIA Olimar a los 374 y 288 en RB para los años 2007-2008, 2008-2009 y 2009-2010, y para los años 2008-2009 y 2009-2010, respectivamente. A los 300 DDA no se detectaron residuos con actividad biológica que pudieran interferir con el cultivo siguiente a la dosis de 110 + 37 g a.e./ha de imazapir + imazapic en la UEPL (Figuras 5C, 5D, 6C y 6D), mientras tanto, se detectaron residuos en el horizonte superficial (Figuras 5A y 5B) pero no en el horizonte subsuperficial en RB (Figura 6A y 6B). No se observaron efectos adversos en el arroz sin tolerancia tanto en la UEPL como en RB, aunque en este último sitio se observó en INIA Olimar un atraso leve en el inicio de la floración en el año 2008-2009. Ese comportamiento está asociado a la ausencia de residuos remanentes detectables del herbicida en la UEPL, así como el bajo nivel de residuos remanentes detectados en RB.

En condiciones de campo se ha reportado menor altura en INIA Olimar sembrada en directa después de un arroz CL. Marchesan *et al.* (2010) trabajando con IRGA 417 en siembra directa sin laboreo, sobre un raigrás antecedido por IRGA 422 CL sobre un planosol (pH 4,5, carbono orgánico 0,7% y arcilla 17%), señalaron que el pH bajo determinó que más herbicida permaneciera adsorbido a los coloides del suelo, evitando estar disponible para la degradación por la

población microbiana que mostró menos actividad dado las temperaturas frías. El hecho de que aún antes de la inundación se observaron síntomas de daño en las plántulas de arroz y posteriormente muerte de ellas, indica la existencia de un nivel de residuos remanentes alto, reduciéndose la población en un 35% a los 10 días después de la emergencia (DDE), y los tallos/planta a los 29 DDE por efecto del herbicida. Posteriormente, los tallos/planta se recuperaron a los 49 DDE (datos no mostrados), sin embargo, disminuyó el número y tamaño de panojas, y resultaron granos más livianos. Las plantas fueron algo más bajas (datos no mostrados) y se obtuvieron menores rendimientos de arroz (Tabla 15).

Sobre esa situación, se sembró raigrás enseguida de la cosecha y a los 705 DDA se realizó siembra directa nuevamente de IRGA 417. La dosis de etiqueta aplicada sola en postemergencia fue el único tratamiento que afectó la población de plantas, sin embargo, no se tradujo en pérdida de rendimiento del IRGA 417 ni en sus componentes, lo que indicaría que los residuos remanentes estaban fuera del umbral que provocara daños severos (Tabla 16).

Andres *et al.* (2011) trabajaron también sobre un suelo planosol (pH 5,3, 0,7% de carbono orgánico y 22% de arcilla) para estudiar el efecto de las dosis de imazetapir + imazapic aplicadas en el arroz tolerante en el cultivo siguiente de arroz no CL. En este caso no se sembró raigrás en los rastrojos de arroz, dejándose que

Tabla 16. Efecto de la mezcla de imazetapir + imazapic asperjada en IRGA 422 CL en el año 2004-2005 en el cultivo siguiente de IRGA 417 sembrado a los 705 días después de la aplicación. Santa María, 2006-2007.

Imazetapir + imazapic g a.e./ha	Población de plantas plantas/m ²	Macollaje ^E tallos/m ²	Población de panojas panojas/m ²	Tamaño panoja granos/panoja	Peso de 1000 granos, g	Rendimiento arroz kg/ha
0	281 a	1,7 a	249 a	68 a	27,5 a	4450 a
52,5+17,5 ^A // 52,5+17,5 ^B	234 ab	2,0 a	273 a	71 a	26,9 a	3887 a
70 + 25 ^C	240 ab	1,9 a	142 a	59 a	26,1 a	3736 a
70 + 25 ^D	195 b	2,3 a	219 a	64 a	26,8 a	3725 a

^A=preemergencia seguida por ^B=postemergencia, ^C=solo en preemergencia, ^D=solo en postemergencia, ^E=registrado a los 29 días después de la emergencia (DDE). Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente entre sí según la prueba de Tukey al 5%. Adaptado de Marchesan *et al.*, 2010.

Tabla 17. Efecto del imazetapir + imazapic aplicado en postemergencia de IRGA 422 CL en 2006-2007 sobre el arroz no CL siguiente sembrado a los 335 DDA en 2007-2008 y a los 710 DDA en 2008-2009. Capao de Leao, RS.

Imazetapir + imazapic g a.e./ha	BRS Querencia a 335 DDA ²		BRS Querencia a 710 DDA	
	Daño 35 DDE ¹ %	Rendimiento kg/ha	Daño 35 DDE %	Rendimiento kg/ha
0	0 a	6443 a	0 a	6835 a
75 + 25	66 b	3813 b	10 b	7276 a
150 + 50	83 c	3261 b	19 b	7215 a

¹=días después de la emergencia, ²=días después de la aplicación. Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente entre sí según la prueba de la Mínima Diferencia Significativa al 5%. Adaptado de Andres *et al.*, 2011.

Tabla 18. Efecto del imazetapir + imazapic aplicado en postemergencia de BRS Señuelo CL en 2007-2008 sobre el arroz no CL siguiente sembrado a los 339 DDA en 2008-2009 y a los 702 DDA en 2009-2010. Capao de Leao, RS.

Imazetapir + imazapic g a.e./ha	BRS Querencia a 339 DDA ²		BRS Querencia a 702 DDA	
	Daño 42 DDE ¹ %	Rendimiento kg/ha	Daño 34 DDE %	Rendimiento kg/ha
0	0 a	6405 a	0 a	5886 a
75 + 25	28 b	5524 b	19 b	5424 ab
150 + 50	66 c	4499 b	23 c	5114 b

¹=días después de la emergencia, ²=días después de la aplicación. Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente entre sí según la prueba de la Mínima Diferencia Significativa al 5%. Adaptado de Andres *et al.*, 2011

retornara la vegetación espontánea en el barbecho cuya cobertura fue disminuida por los residuos del herbicida. Los autores concluyeron que se necesitan un intervalo de 2 años para realizar una siembra segura en ese tipo de suelo predominante en la región del sureste de Río Grande del Sur (Tablas 17 y 18).

En Río Branco, Saldain *et al.* (2014c) estudiaron el efecto en el sorgo forrajero sembrado a los 396 y 312 DDA del herbicida para los años 2008-2009 y 2009-2010, respectivamente. Aunque es una especie muy sensible frente a los residuos de estos herbicidas, los residuos disponibles (Figura 5A y 5B) no alcanzaron el umbral que induce pérdidas de plantas y de productividad del sorgo forrajero (Tabla 19).

Ávila *et al.* (2009) estudiaron el efecto de la aplicación de la premezcla de imazetapir + imazapic en IRGA 422 CL sobre el sorgo forrajero sembrado posteriormente en Santa María. Al contrario

de lo anteriormente reportado, a los 360 DDA encontraron toxicidad severa en las plántulas del sorgo persistiendo hasta los 35 DDE, lo que redujo significativamente la productividad. A pesar de detectar efectos adversos en las plántulas a los 710 DDA estas se recuperaron rápidamente y no se afectó la productividad (Tabla 20). En el mismo sentido, Pinto *et al.* (2009a) encontraron que en un suelo planosol (pH 5, carbono orgánico de 0,7% y arcilla 15,4%) la dosis de etiqueta de imazetapir + imazapic (75 g e.a. + 25 g e.a./ha) y el doble, aplicados en postemergencia en el arroz CL, redujeron la población de plantas de sorgo granífero. A partir de los 7 días después de la emergencia (DDE), observaron síntomas de daño en las plántulas de sorgo, ocurriendo muerte de plantas entre los 42 a 70 DDE. La población de plantas disminuyó entre un 21 a 31% en las parcelas tratadas con la dosis de etiqueta con respecto al testigo

Tabla 19. Resultados obtenidos frente a los residuos remanentes de imazapir + imazapic generados en el suelo con el sorgo forrajero (cv. Talisman en 2009 y cv. ACA 764 en 2010) en Río Branco*.

Imazapir + imazapic g a.e./ha	Población plantas plantas/m ²	Altura planta cm/planta	Materia seca producida en 180 DDS t/ha
0	31 b	193 a	9,11 a
110 + 37	38 ab	194 a	9,22 a
220 + 74	42 a	193 a	9,91 a

*=Promedio de dos ensayos en 2008-2009 y 2009-2010. Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente entre sí según la prueba de la Mínima Diferencia Significativa al 5%.

Tabla 20. Efecto de la aplicación de imazetapir + imazapic en IRGA 422 CL (2006-2007) en el sorgo forrajero sembrado en dos momentos. Santa María, 2007-2008 y 2008-2009.

Imazetapir + imazapic g a.e./ha	Materia seca producida	
	360 DDA* tt/ha	710 DDA tt/ha
0	4,32 a	4,7 a
75 + 25	2,18 b	5,1 a
150 + 50	1,37 c	4,9 a

*= días después de la aplicación. Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente entre sí según la prueba de la Mínima Diferencia Significativa al 5%. Adaptado de Ávila *et al.*, 2009.

sin tratar, mientras que las pérdidas se duplicaron al usar la dosis doble. Además, ese efecto adverso se tradujo en la reducción significativa de la materia seca total producida al inicio de la floración, así como en la productividad del grano. A la dosis de etiqueta, los residuos de imazetapir + imazapic remanentes en el suelo redujeron ambas variables en un 38%, mientras que cuando se duplicó la dosis la reducción fue el doble. Los autores señalan que existe evidencia experimental de que cantidades pequeñas de imazapic son suficientes para provocar daño en los cultivos siguientes, y que, además, este principio activo produce sinergias cuando se lo mezcla con otras imidazolinonas.

Aunque no hay una comprensión cabal de cómo opera el raigrás en cuanto a la disipación, cuando se finaliza el raigrás en la preparación de la cama de siembra en directa, los restos secos se descomponen y los residuos remanentes del herbicida podrían ser

metabolizados por la población microbiana, dependiendo de las condiciones ambientales. Souto *et al.* (2013) establecieron que el suelo de la rizosfera del raigrás cuando se lo compara con un suelo sin vegetación contribuyó a la disipación por estímulo a la población microbiana, aunque en mucho menor medida que lo hace la rizosfera de las leguminosas evaluadas.

Efecto de los residuos remanentes del imazapir + imazapic en arroz no CL bajo siembra convencional

Saldain (2010) evaluó el efecto de la residualidad de estos herbicidas sobre la productividad de distintas variedades de arroz. Se incluyeron arroces tipo *índica* como las variedades INIA Olimar, El Paso 144 y Puitá INTA CL, de tipo tropical *japónica* como INIA Tacuarí y CL 161 y tipo *japónica* templada, la variedad EEA 404. En el año 2005-2006, se sembró CL161 en

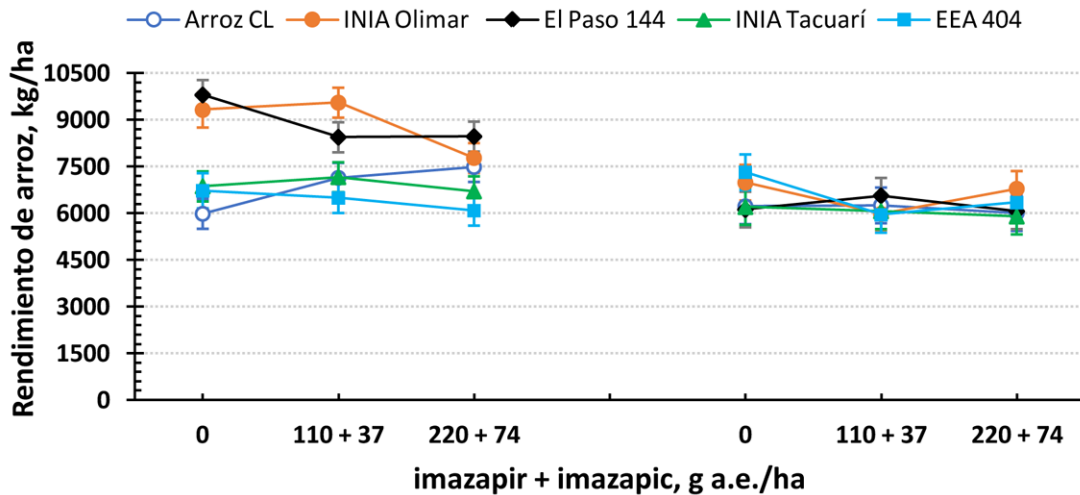


Figura 8. Rendimiento de arroz (kg/ha) frente a dosis crecientes de la premezcla de imazapir + imazapic aplicada en postemergencia al arroz CL el año anterior en la Unidad Experimental Paso de La Laguna. Izq. Siembra 2006-2007 (304 DDA), Der. Siembra 2007-2008 (332 DDA). DDA=días después de la aplicación.

un suelo brunosol (pH 5,3, 0,8 % de carbono orgánico y 23% de arcilla), mientras que en el año 2006-2007 se utilizó Puitá INTA CL en un brunosol (pH 5,5, 0,7% de carbono orgánico y 31 % de arcilla). En ambos años previo a la siembra de las variedades de arroz no CL se hizo un laboreo superficial con excéntrica liviana (dos pasadas) sobre el rastrojo del arroz CL, sin nivelar, sembrándose las variedades previo pasada de rodillo. En el año 2006-2007, la siembra se realizó a los 304 DDA y se observó un comportamiento diferencial entre INIA Olimar y El Paso 144; mientras la primera parece tolerar bien los residuos remanentes dejados por la dosis intermedia, El Paso144 redujo su rendimiento comparado con el testigo sin imidazolinonas. Las otras variedades no fueron afectadas, salvo INIA Tacuarí que atrasó seis días el inicio de floración con el aumento de la dosis. Cuando se repitió el ensayo de manera independiente en el año 2006-2007, la siembra se realizó a los 332 DDA y los residuos remanentes ese año no indujeron ninguna respuesta adversa ni pérdida de rendimiento de arroz en ninguna de las variedades evaluadas (Figura 8).

Efecto de los residuos remanentes del imazapir + imazapic sobre la soja siguiente

En el país, no se ha evaluado este aspecto de los residuos remanentes del herbicida sobre el crecimiento y productividad de la soja, pero sí hay información de Río Grande del Sur, BR.

Ulguim *et al.* (2019) trabajaron sobre un gleysol (pH 5,3, 0,99% de carbono orgánico y 17% de arcilla), con dosis que incluyeron desde la de etiqueta hasta ocho veces la misma para simular escenarios contrastantes. Detectaron que la tasa de emisión de nudos se retrasa y los grados acumulados necesarios para obtener un nudo nuevo en soja aumenta a partir de la dosis doble, lo que indica retraso del crecimiento; también el número de ramas por planta, la altura de planta, el número de chauchas por planta y el número de nudos al estado de R8 disminuyen con el uso de la dosis de etiqueta. Al afectarse a algunos de los componentes del rendimiento, la productividad de grano se redujo al aumentar las dosis (Figura 9).

Oliveira *et al.* (2019) encontraron resultados divergentes con los anteriores autores en cuanto a la respuesta de la soja. Sobre un suelo planosol (pH 5,8, 1,2% de carbono

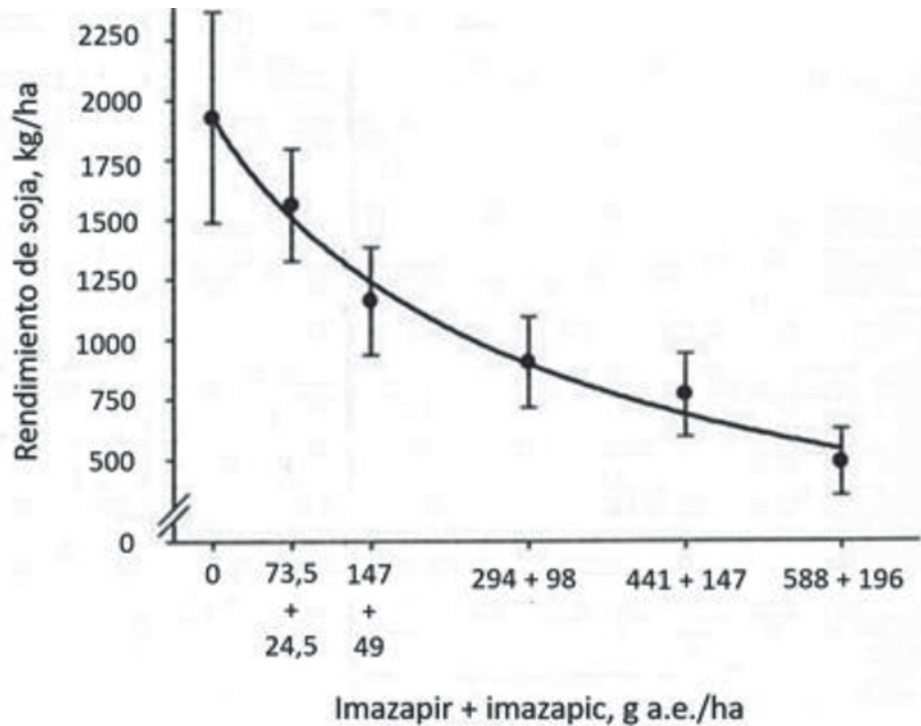


Figura 9. Respuesta en el rendimiento de soja (kg/ha) siguiente a los residuos remanentes dejados por el uso de dosis crecientes de imazapir + imazapic aplicadas en postemergencia en el arroz CL en 2014-2015. Santa María, 2015-2016 (Adaptado de Ulguim et al., 2019).

orgánico y 25% de arcilla), se sembró raigrás sobre el rastrojo de arroz CL a los 129 DDA, seguido posteriormente por una soja a los 359 DDA del imazapir + imazapic, no encontrándose relación entre las dosis del herbicida y el rendimiento de la oleaginosa. Sin embargo, en los estados fenológicos V3 y R1 algunos atributos de la soja fueron afectados por las dosis de imazapir + imazapic evaluadas con respecto al testigo, cuando la humedad de suelo superó el 70% de la capacidad de campo y en presencia de raigrás que fue afectado por el herbicida,

recuperándose la soja sin afectar el rendimiento (Tablas 21 y 22). Además, detectaron un comportamiento diferencial debido a la cobertura de raigrás y la humedad del suelo en el barbecho que afectó el rendimiento de la oleaginosa (Tabla 22).

Los autores señalan que el menor rendimiento de soja observado cuando fue sembrada sobre el raigrás crecido bajo condiciones de suelo seco podría estar explicado por un ascenso tardío del herbicida por capilaridad en las parcelas tratadas

Tabla 21. Características de la soja en estado vegetativo y reproductivo afectadas por la presencia de cobertura en el barbecho para el nivel de humedad del suelo mayor a 70% de la capacidad de campo. Santa María, 2016-2017.

Cobertura en la entre zafra	Volumen radicular estado V3 cm ³ /planta	Altura de planta estado R1 cm/planta	Materia seca del tallo estado R1 g/planta
Con raigrás*	0,66 b	43,5 b	10,4 b
Sin raigrás	0,82 a	46,2 a	12,6 a

*=promedio de las tres dosis empleadas. Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente entre sí según la prueba de la Mínima Diferencia Significativa al 5%. Adaptado de Oliveira et al., 2019.

Tabla 22. Efecto de la cobertura y la humedad del suelo en el barbecho el rendimiento de soja. Santa María, 2016-2017.

Cobertura en la entre zafra	Rendimiento en grano de la soja	
	Humedad suelo > a 70% CC**	Humedad suelo bajo ambiente
Con raigrás*	3733 a	3406 b
Sin raigrás	3869 a	3765 a

*=promedio de las tres dosis evaluadas, **=capacidad de campo. Las medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente entre sí dentro de la columna según la prueba de la Mínima Diferencia Significativa al 5%. Adaptado de Oliveira *et al.*, 2019.

dado que afectó muy levemente al raigrás y a la soja en el crecimiento vegetativo inicial. Dicho herbicida disponible fue absorbido por la soja más tardíamente afectando su rendimiento. Además, proponen que la elevada producción de raigrás (6000 kg/ha) en las parcelas sin imidazolinonas podría promover la inmovilización de nitrógeno dada la alta relación C/N cuando se descomponen los restos del raigrás, deprimiendo el rendimiento.

¿CÓMO MITIGAR LOS EFECTOS NO DESEADOS DE LOS RESIDUOS REMANENTES DE LOS HERBICIDAS?

Es claro establecer que la mitigación empieza con las decisiones que se toman cuando se hace el arroz CL, incluyendo saber cómo es el suelo por utilizar. El foco debe de estar en dejar la menor cantidad de residuos de los herbicidas para los cultivos siguientes. Para ello, hay que evitar repetir el arroz CL por más de dos años seguidos y siempre dividir las aplicaciones en preemergencia y postemergencia temprana. Si la situación indica aumentar la dosis por elevado enmalezamiento, el aumento deberá ser preferentemente mayor en la dosis en preemergencia que tendrá más tiempo para disiparse; el aumento de dosis deberá ser menor si es necesario realizar la aplicación en postemergencia temprana. No se recomienda poner el doble de la dosis en una aplicación ya que aumenta la cantidad de residuos remanentes en esa situación. Otra medida de manejo posible sería atrasar la inundación hasta una semana si se observa que hay humedad en el suelo, para

ayudar a que se disipe algo del herbicida por degradación microbiana.

A pesar de usar todas estas estrategias, siempre quedan residuos remanentes, por lo que es recomendable romper taipas y drenar la chacra enseguida de la cosecha del arroz para facilitar la aeración de la superficie del suelo. Esta aeración combinada con la humedad y la temperatura adecuadas en el otoño hará que funcione la degradación microbiana, contribuyendo a la disipación de los residuos ubicados más cerca de la superficie. La mayoría de los suelos aptos para el cultivo del arroz presentan una napa colgada permanente, aumentando su espesor en el invierno y siendo menor en el verano. Está demostrado que quedan residuos ubicados más profundos en el suelo que para ser disipados hay que traerlos a la superficie por medio de laboreo, o eventualmente emplear especies que los consuman y los trasladen hacia el horizonte superficial del suelo. Hay que tener en cuenta que se pueden producir pérdidas de productividad en el raigrás y en el trébol rojo, mientras que especies el trébol blanco, lotus y la soja estimulan a la población microbiana nativa del suelo de la rizosfera para acelerar su degradación dentro de ciertos rangos de concentración del imazapir + imazapic.

Gehrke *et al.* (2021) señalaron que al aumentar moderadamente la materia orgánica del suelo trae un aumento de la población microbiana, lo que mejora la capacidad de degradación metabólica. Todo lo que se haga para favorecer esa característica mejorará la capacidad del suelo de detoxificar los residuos, como la siembra de mezclas de forrajeras incluyendo gramíneas y leguminosas como el trébol blanco y el

lotus, además de otras leguminosas anuales adaptadas al ambiente de las tierras bajas. Ellos también proponen usar el encalado de los suelos más ácidos para favorecer la disponibilidad de estos herbicidas y de esa manera los microorganismos puedan acceder a los residuos y metabolizarlos.

En resumen, la principal estrategia es evitar la acumulación excesiva de residuos en el suelo ya que nos reduce las opciones productivas y aumenta los costos de producción.

BIBLIOGRAFÍA

- Aichele, T.M.; Penner, D.** 2005. Adsorption, desorption, and degradation of imidazolinones in soil. *Weed Technology*, 19(1):154–159. <https://doi.org/10.1614/WT-04-057R>
- Anderson, W. P.** 1996. *Weed science: principles and applications*. Anderson, W.P. (Ed.); 3a. ed. West Publishing Company. 789 p.
- Andres, A.; Avila, L. A.; Theisen, G.; Saldain, N.** 2011. Carryover of imazethapyr + imazapic to natural winter pasture and to non-tolerant rice. *XIV Symposium in Pesticide Chemistry Pesticides in the Environment: Fate, Modelling and Risk Mitigation*.
- Avila, L.A.; Cassol, G.V.; Marchezan, E.; Cezimbra, D. M.; Filho, G.R.; Saldain, N.** 2009. Compartimento do sorgo forrageiro semeado um o dois anos após a aplicacao da mistura formulada da imazethapyr e imazapic. In SOSBAI & UFRGS (Eds.), *VI Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado*. IRGA.
- Avila, Luis A.; Massey, J.H.; Senseman, S.A.; Armbrust, K.L.; Lancaster, S.R.; Mccauley, G.N.; Chandler, J.M.** 2006. Imazethapyr aqueous photolysis, reaction quantum yield, and hydroxyl radical rate constant. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(7):2635-9. <https://doi.org/10.1021/jf052214b>
- Bundt, A.D.C.; Avila, L.A.; Agostinetto, D.; Nohatto, M.A.; Vargas, H.C.** 2015. Carryover of imazethapyr + imazapic on ryegrass and non-tolerant rice as affected by thickness of soil profile. *Planta Daninha*, 33(2):357–364. <https://doi.org/10.1590/0100-83582015000200022>
- Bundt, A.D.C.; Avila, L.A.; Pinto, J.J.O.; Santos, T.T.; Agostinetto, D.; Martins, K.** 2013. Transporte ascendente da mistura formulada de imazethapyr e imazapic em resposta à profundidade do lençol freático. *Ciência Rural*, 43(9):1597–1604. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013005000111>
- Espy, R.; Pelton, E.; Opseth, A.; Kasprisin, J.; Nienow, A.M.** 2011. Photodegradation of the herbicide imazethapyr in aqueous solution: Effects of wavelength, pH, and natural organic matter (NOM) and analysis of photoproducts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 7277–7285. <https://doi.org/10.1021/jf200573g>
- Flint, J. L.; Witt, W.W.** 1997. Microbial degradation of imazaquin and imazethapyr. *Weed Science*, 45(4): 586–591. <https://doi.org/10.1017/S004317450008886X>
- Gehrke, V. R.; Fipke, M.V.; Avila, L.A.; Camargo, E. R.** 2021. Understanding the opportunities to mitigate carryover of imidazolinone herbicides in lowland rice. *Agriculture*, 11(4):299–316. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040299>
- Harir, M.; Gaspar, A.; Frommberger, M.; Lucio, M.; El Azzouzi, M.; Martens, D.; Kettrup, A.; Schmitt-Kopplin, P.H.** 2007. Photolysis pathway of imazapic in aqueous solution: ultrahigh resolution mass spectrometry analysis of intermediates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(24):9936–9943. <https://doi.org/10.1021/jf0720279>
- Helling, C. S.** 2005. The science of soil residual herbicides. In: van Acker, R.C. (Ed.), *Soil residual herbicides: science and management*. Sainte-Anne-de-Bellevue: Canadian Weed Science Society - Société canadienne de malherbologie. p. 3–22.
- Hsiao, Y. L., Wang, Y. S., & Yen, J. H.** 2014. Enantioselective effects of herbicide imazapyr on *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 49(9): 646–653. <https://doi.org/10.1080/03601234.2014.922404>

- Junkes, G. V.; Camargo, E. R.; Avila, L. A.; Kemmerich, M.; Gehrke, R.** 2019. Manejo intermitente da irrigação favorece a dissipação da mistura imazapyr + imazapic em solos de várzea. In: EPAGRI (Ed.), *XI Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado Inovação e desenvolvimento*. Camboriú: SOSBAI. p. 103–103.
- Kraemer, A. F.; Marchesan, E.; Grohs, M.; Avila, L. A.; Oliveira, S.L.M.; Zanella, R.; Sachet, P. F. M.; Sarzi, G. M.S.** 2009. Lixiviação do imazethapyr em solo de várzea sob dois sistemas de manejo. *Ciência Rural*, 39(6):1660–1666. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000119>
- Mallipudi, N.M.; Stout, S.J.; Dacunha, A.R.; Lee, A.** 1991. Photolysis of imazapyr (AC 243997) herbicide in aqueous media. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39(2):412–417. <https://doi.org/10.1021/jf00002a038>
- Mangels, G.** 1991. Behavior of Imidazolinone Herbicides in Soil - A Review of the Literature. In: Shaner, D.L.; O'Connor, S.L. (Eds). *The Imidazolinone herbicide*, pp. 191–209). Boca Raton: CRC Press, Inc.
- Marchesan, E.; Dos Santos, F. M.; Grohs, M.; De Avila, L. A.; Machado, S.L.O.; Senseman, S.A.; Massoni, P.F.S.; Sartori, G.M.S.** 2010. Carryover of Imazethapyr and Imazapic to Nontolerant Rice. *Weed Technology*, 24(1). <https://doi.org/10.1614/WT-08-153.1>
- Oliveira, M. L.; Marchesan, E.; Soares, C. F.; Farias, J. G.; Ulguim, A. da R.; Fleck, A.G.; Coelho, L.L.** 2019. Persistence of imazapyr+imazapic in irrigated rice area and effect on soybean due to soil moisture and phytoremediation in the off-season. *Bragantia*, 78(3). <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20190074>
- Pinto, J.J.O.; Noldin, J.A.; Rosenthal, M.D.; Pinho, C.F.; Rossi, F.; Machado, A.; Piveta, L.; Galon, L.** 2009a. Atividade residual de (imazethapyr+imazapic) sobre azevém anual (*Lolium multiflorum*), semeado em sucessão ao arroz irrigado, sistema Clearfield. *Planta Daninha*, 27(3): 609-613. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582009000300023>
- Pinto, J.J.O.; Noldin, J.A.; Pinho, C.F.; Rossi, F.; Galon, L.; Almeida, G. F.** 2009b. Atividade residual de (imazethapyr + imazapic) para sorgo granífero (*Sorghum bicolor*) semeado em rotação com o arroz irrigado. *Planta Daninha*, 27:1015-1024. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582009000500015>
- Rabuffetti, A.; Deambrosi, E.** 2017. Dinámica de nutrientes en suelos inundados. In: Rabuffetti, A. (Ed.). *La Fertilidad del suelo y su manejo. Volumen II*. Montevideo: Editorial Hemisferio Sur. p. 679-736.
- Ramezani, M.; Oliver, D.P.; Kookans, R.S.; Gill, G.; Preston, C.** 2008. Abiotic degradation (photodegradation and hydrolysis) of imidazolinone herbicides. *Journal of Environmental Science and Health Part B*, 43(2):105–112. <https://doi.org/10.1080/03601230701794968>
- Ramezani, M.** 2007. *Environmental Fate of Imidazolinone Herbicides and their antiomers in soil and water*. South Australia: The University of Adelaide. 177 p.
- Refatti, J. P.; Avila, L. A.; Agostinetto, D.; Manica, R.B.; Das Cas, A.B.; Balbé, D.E.** 2014. Efeito da calagem na lixiviação de imazethapyr e imazapyr em solo de cultivo de arroz irrigado. *Ciência Rural*, 44(6):1008–1014. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000600009>
- Saldain, N.E.** 2010. Efecto del imazapir + imazapic aplicados en el arroz Clearfield sobre las variedades de arroz sin resistencia a las imidazolinonas. In: Filippini, J. M. A. (Ed.), *Sustentabilidade socioambiental da bacia da Lagoa Mirim*. Pelotas: EMBRAPA Clima Temperado, 2010 p. 163-170.
- Saldain, N.E.; Bermúdez, R.; Serrón, N.; López, A.; Sosa, B.** 2014b. Efecto de la dosis de Kifit y del manejo del riego en la productividad inicial de la pradera subsiguiente. En: INIA Treinta y Tres. Arroz-Soja:Resultados Experimentales 2013-2014. Treinta y Tres: INIA Treinta y Tres. cap. 5. p. 11-13. (INIA Serie Actividades de Difusión; 735)
- Saldain, N.E.; Bermúdez, R.; Serrón, N.; Sosa, B.** 2012. Efecto del Kifix (Imazapir + Imazapic) asperjado en el arroz clearfield sobre las plantas forrajeras subsiguientes en el Este del Uruguay. In: INIA Treinta y Tres. *Arroz: resultados experimentales 2011-2012*. Treinta y Tres: INIA, 2012. cap. 5 p.32-37. (INIA Serie Actividades de Difusión; 686)

- Saldain, N.E.; López, A.; Sosa, B.** 2014c. Efecto del Kifix asperjado en el arroz clearfield sobre el raigrás subsiguiente seguido por arroz sin resistencia (no clearfield) o sorgo forrajero en siembra directa. En: INIA Treinta y Tres. *Arroz-Soja: Resultados Experimentales 2013-2014*. Treinta y Tres: INIA. cap. 5. p. 14-16. (INIA Serie Actividades de Difusión; 735)
- Saldain, N.E.; López, A.; Sosa, B.** 2014a. Persistencia y actividad biológica del Kifix en suelos arroceros en el Este del Uruguay. En: INIA Treinta y Tres. *Arroz-Soja: Resultados Experimentales 2013-2014*. Treinta y Tres: INIA. cap. 5. p. 17-19. (INIA Serie Actividades de Difusión; 735)
- Saldain, N.E.; Oxley, M.; López, A.; Sosa, B.** 2015. Bioensayo con semillas de el Paso 144 del agua de inundación proveniente de parcelas tratadas con y sin Kifix. In: INIA Treinta y Tres. *Resultados experimentales 2014-2015*. Treinta y Tres: INIA, 2015. cap. 2, p. 16-18. (INIA, Serie Actividades de Difusión; 748)
- Santos, L. O.; Pinto, J.J.O.; Piveta, L.B.; Noldin, J.A., Galon, L.; Concenço, G.** 2014. Carryover effect of imidazolinone herbicides for crops following rice. *American Journal of Plant Sciences*, 05(08):1049–1058. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.58117>
- Schreiber, F.; Scherner, A.; Massey, J.H.; Zanella, R.; Avila, L.A.** 2017. Dissipation of clomazone, imazapyr and imazapic herbicides in paddy water under two rice flood managements regimes. *Weed Technology*, 31(2):330-340. <https://doi.org/10.1017/wet.2017.5>
- Shaner, D. L. (Ed.)**. 2014. *Herbicide Handbook* (Tenth). Lawrence, KS : Weed Science Society of America.
- Souto, K. M.; Jacques, R.J.S.; Avila, L.A.; Machado, S.L.O.; Zanella, R.; Reffatti, J.P.** 2013. Biodegradation of the herbicides imazethapyr and imazapic in rhizosphere soil of six plants species. *Ciência Rural*, 43(10):1790–1796. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013001000010>
- Su, W.; Hao, H.; Ding, M.; Wu, R.; Xu, H.; Xue, F.; Shen, C.; Sun, L.; Lou, C.** 2019. Adsorption and degradation of imazapic in soils under different environmental conditions. *PLoS ONE* 14(7): e0219462 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219462>
- Ulguim, A.R.; Carlos, F.S.; Zanon, A.J.; Ogoshi, C.; Bexaira, K.P.; Silva, P.R.F.** 2019. Is increasing doses of imazapyr + imazapic detrimental to the main crop rotation alternatives to flooded rice? *Planta Daninha*, 37: e019217913 <https://doi.org/10.1590/S0100-83582019370100148>
- Umpiérrez, E.; Villagrán, V.; López, A.; Sosa, B.; Saldain, N.** 2014. Disipación del Kifix® en el agua de inundación del arroz Clearfield®. In: INIA Treinta y Tres. *Arroz-Soja: Resultados Experimentales 2013-2014*. Treinta y Tres: INIA Treinta y Tres. cap. 5. p. 20-22 (INIA Serie Actividades de Difusión; 735)
- Wang, Q.; Liu, W.** 1999. Correlation of imazapyr adsorption and desorption with soil properties. *Soil Science*, 164(6):411–416.
- Wang, X.; Wang, H.; Fan, D.** 2006. Degradation and metabolism of imazapyr in soils under aerobic and anaerobic conditions. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 86(8):541-551. <https://doi.org/10.1080/03067310500410730>
- Yavari, S.; Sapari, N.B.; Malakahmad, A.; Razali, M.A. Bin; Gervais, T.S.; Yavari, S.** 2020. Adsorption–Desorption Behavior of Polar Imidazolinone Herbicides in Tropical Paddy Fields Soils. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 104(1):121–127. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02759-y>
- Zanella, R.; Adaime, A.B.; Peixoto, S.C.; Friggi, C.A.; Prestes, O.D.; Machado, S.L.O.; Marchezan, E.; Avila, L.A.; Primel, E.G.** 2011. Herbicide persistence in rice paddy water in Southern Brazil. In: Hasaneen; M.N.A. (Ed.), *Herbicides mechanisms and mode of action*. InTech. p. 204. <https://doi.org/10.5772/32727>

8 - EL USO SOSTENIBLE DEL ARROZ RESISTENTE A IMIDAZOLINONAS INCLUYE ROTACIONES

N.E. Saldain¹, C. Marchesi², J. Rosas³, A. L. Pereira⁴

PALABRAS CLAVE: acumulación residuos herbicidas, malezas resistentes ALS, rotaciones

INTRODUCCIÓN

El sistema de producción de arroz Clearfield® (CL) es la combinación del cultivo con resistencia a imidazolinonas y el uso de dos integrantes de esa familia de herbicidas, imazapir e imazapic, para el control selectivo del arroz maleza (AM) y un amplio espectro de otras malezas.

La empresa BASF recomienda sembrar hasta dos años seguidos de arroz CL aplicando la dosis estándar de 73,5 + 24,5 g a.e./ha de imazapir + imazapic en preemergencia, seguido de una dosis igual en postemergencia temprana para el control eficaz de infestaciones medias del AM. Además, se destaca como complemento de lo anterior que la inundación se realice a partir de las 72 h de esta última aplicación. Estas recomendaciones buscan preservar la vida útil de la tecnología en términos de eficacia de control del herbicida asociado, especialmente, en el control del AM.

La introducción del arroz CL en el país ocurrió en un contexto favorable a la sostenibilidad de la tecnología. Por un lado, la existencia de un sistema de producción de semillas certificadas robusto e integrado y por otro, apenas 31% del área arrocerá presentaba infestación de AM siendo muy variable en términos de densidad de plantas y área afectada. La adopción de la tecnología favoreció la obtención de

elevadas productividades en las chacras que presentaban muy altas infestaciones de arroz maleza y además permitió el retorno a la producción del cereal de otras áreas que habían tenido una larga historia del cultivo. Al concentrar el uso del arroz CL en las áreas mencionadas, especialmente las que tenían poblaciones más altas de la maleza, se manifestaron a lo largo de los años diversos eventos que comprometen la sostenibilidad de la tecnología.

¿Qué pasó con las poblaciones del arroz maleza?

La frecuencia del uso de la tecnología condiciona los resultados obtenidos en el control de la maleza en el mediano plazo, como se ilustra en dos chacras ubicadas alambrado por medio (Figura 1). En una de ellas se realizaron dos cultivos de arroz CL, uno de soja y dos de arroz convencional, alternando entre cultivos con un año de barbecho, mientras que en la otra chacra se cultivaron cinco arroces CL alternando entre cultivos con un año de barbecho (5 años de cultivo en 10 años en ambas chacras). En la primera situación, la infestación de arroz maleza es aún muy abundante y susceptible por lo que la tecnología CL se mantiene eficaz en el control de la maleza. Sin embargo, se ve que a pesar de solo haber

¹ Néstor Saldain. Ing. Agr. M.Sc. INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz (hasta junio 2021). nsaldain56@gmail.com

² Claudia Marchesi. Ing. Agr. M.Sc. Ph.D. INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz. cmarchesi@inia.org.uy

³ Juan Rosas. Lic. M.Sc. Dr. Cs. Agrarias, INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción de Arroz. jrosas@inia.org.uy

⁴ Ana Laura Pereira. Ing. Agr. D. Sc. INIA. Unidad de Semillas. apereira@inia.org.uy

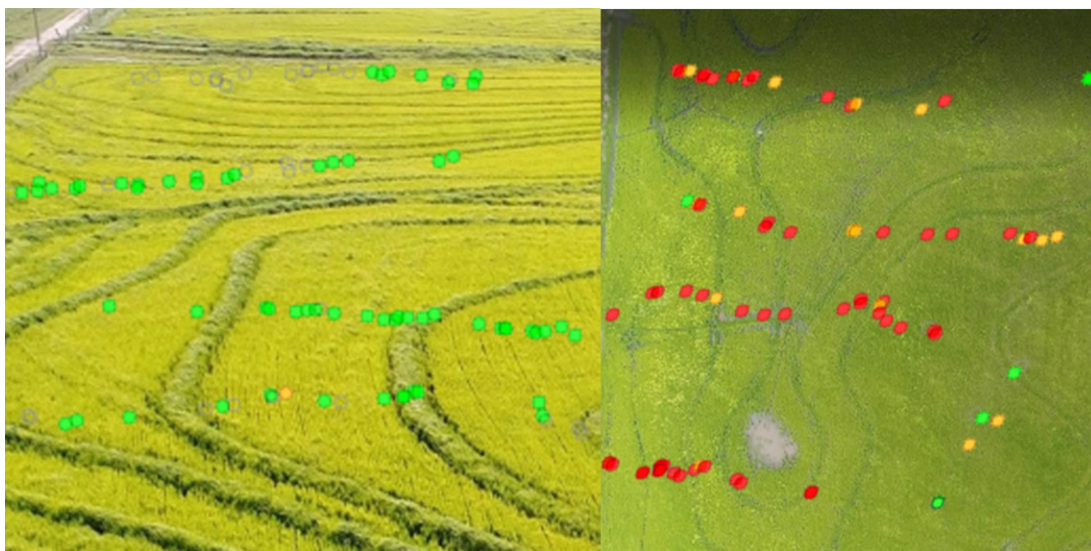


Figura 1. Susceptibilidad del AM a la mezcla preformulada de imazapir + imazapic, y mutaciones de resistencia en dos chacras con historia contrastante. Río Branco, 2017-2018. Izq.: población abundante de AM susceptible que sobresale sobre el arroz en el cuadro y en la taipa. Der.: población menos abundante del AM resistente al herbicida que se distingue por su color verde claro. Los puntos representan la ubicación de plantas analizadas para presencia de mutaciones de resistencia al herbicida. Círculos verdes= homocigotas susceptibles, naranjas= heterocigotas resistentes, rojos =homocigotas resistentes, vacíos = no analizado. N.E. Saldain, J. Rosas y B. Sosa (sin publicar).

cultivado dos años arroz Clearfield® se detectó una planta que porta la mutación de resistencia al herbicida. Por otro lado, en la segunda chacra donde se hibridó tempranamente la maleza con el arroz CL y se siguió cultivando el mismo se fueron seleccionando las plantas resistentes, siendo prácticamente todo lo muestreado resistente al herbicida tanto en individuos heterocigotas como homocigotas. En esta situación, la tecnología CL ya no es útil por lo que se hace necesario bajar la población resistente por otros medios.

¿Qué pasó con las poblaciones de capín?

Por otro lado, el uso muy frecuente de la tecnología CL acarrea problemas de resistencia a los herbicidas inhibidores de la ALS de otras malezas muy importantes del sistema arrocero, como lo son las *Echinochloas* y las ciperáceas. Esto complejiza mucho más el control de malezas en general, encarece enormemente la producción y reduce rendimientos en muy alta proporción.

El uso recurrente de la tecnología Clearfield® durante varios años, trae aparejado el rápido surgimiento de *Echinochloas* (capines) resistentes. Después de tres años seguidos de arroz CL se observan distintos escapes de capín en grupos pequeños en el área tratada, mientras que en una chacra donde se alternaron años de arroz CL y años de barbecho durante un período de 10 años, se aprecia que existen menos grupos con diámetro muy grande debido a las abundantes plantas de capín cuyo fenotipo es muy similar entre sí, habiéndose confirmado resistencia en ambos casos, especialmente con alto nivel de resistencia en la última situación relatada (Figura 2).

¿Qué pasó con la acumulación de los residuos de imazapir + imazapic?

Otro aspecto relevante cuando se usa reiteradamente el arroz resistente a las imidazolinonas es lo relativo a la acumulación de residuos de los herbicidas en el perfil del suelo. Los estudios realizados, con un solo año de aplicación de la mezcla preformulada de imazapir + imazapic,



Figura 2. Escapes de capín al control de la aplicación de la mezcla preformulada de imazapir + imazapic en dos situaciones distintas. Izq.: escapes pequeños y dispersos en el área tratada después de tres años seguidos de arroz Clearfield®, Der. superior: escapes de capín abundantes en una chacra con 5 años de arroz Clearfield® alternando con un año de barbecho, Der. inferior: muy llamativa la gran uniformidad de las plantas de capín en su aspecto y ciclo dentro de ese grupo.

indican que todas las especies estudiadas en ausencia de laboreo se implantan bien sin afectación de la población inicial. Sin embargo, el crecimiento es afectado dependiendo la magnitud de la reducción del nivel de residuos disponible en el suelo. De las especies estudiadas, el sorgo forrajero es muy sensible porque su productividad se afecta aún a los 10 meses de aplicado el último herbicida con imazapir + imazapic. En este caso particular, en un suelo arenoso, profundo, pH de 5,0 y con materia orgánica baja, después de dos años de arroz Clearfield® a las dosis recomendadas por BASF, con una pasada de la hoja niveladora para romper las taipas sin laboreo, se sembró el sorgo forrajero directamente. Se aprecia la diferencia en el crecimiento y el atraso en el ciclo de éste cuando se compara el cuadro con el sitio donde estaba la base de la taipa, donde no llegó el herbicida (Figura 3).

Las especies forrajeras sembradas sin laboreo directamente sobre el rastrojo de arroz CL después de la cosecha se han

implantado sin problemas y el crecimiento hasta los 90 días después de la siembra no fue afectado. El efecto adverso fue observado en la productividad en el raigrás y el trébol rojo a los 180 días después de la siembra. La magnitud de la reducción dependerá de la cantidad de residuos del herbicida acumulados en los horizontes superficiales del suelo. Los factores que determinarán la magnitud de la acumulación serán la frecuencia del arroz CL, la realización de laboreo de verano y su profundidad entre arroses CL, las dosis del herbicida usadas con mucho énfasis en la empleada en postemergencia, cuando se realiza la inundación, los contenidos de materia orgánica y arcilla, y el pH del suelo.

¿Qué pasó con la deriva de los herbicidas?

Si bien este un aspecto que no se desarrolló en los capítulos anteriores, es necesario realizar algunos comentarios.



Figura 3. Sorgo forrajero afectado por los residuos de la mezcla de imazapir + Imazapic. Este de Cerro Largo, 2016-2017.

La deriva de herbicida fue frecuente cuando fue creciendo el área del arroz CL hacia el arroz convencional, observándose distintos daños (Hensly *et al.*, 2012; Leiva y Zaldúa, 2016). Esto obligó a organizarse de tal manera de evitar que quedaran áreas con variedades convencionales rodeadas de arroz CL.

La promoción de siembras tempranas en el arroz para lograr mayor productividad y la recuperación del precio de la soja han estimulado el uso de este último cultivo en rotación con arroz en suelos arroceros típicos. Estos hechos junto a otros dibujan un escenario propenso a que se produzcan eventos de deriva de los herbicidas de un cultivo hacia el otro dado su proximidad (Saldain y Deambrosi, 2005; Saldain, 2007; Hensley *et al.*, 2013). Las aplicaciones de herbicidas en el arroz, con temperaturas subóptimas para su crecimiento, provoca más frecuentemente fitotoxicidad en el mismo, mientras que la soja en estado vegetativo con pocas hojas verdaderas queda muy expuesta a recibir deriva de los herbici-

das inhibidores de la ALS usados en el arroz que producen daño severo (Walker, 2018). Este factor adicional agrega más variabilidad a los rendimientos de soja en secano que, además, puede llegar a sufrir en el mismo año tanto sequía como excesos de agua en períodos críticos para el cultivo.

¿Qué pasa cuando en el apuro no se leen las etiquetas de los herbicidas a utilizar?

Uno de los atributos entre varios que tiene la producción de arroz en Uruguay es que hace un uso de insecticidas muy reducido, aunque existe en algunos actores una práctica arraigada de mezclar herbicidas con insecticidas en el afán de prevenir la aparición de plagas y reducir costos, práctica que no está respaldada por la evidencia. No se aconseja usar insecticidas organofosforados aplicados a la semilla, en tratamiento del suelo o mezclado en el tanque con el herbicida preformulado de imazapir + imazapic

como lo establece la etiqueta del producto. Cuando esto ocurre, se pueden producir daños muy severos en la planta de arroz, con elevadas probabilidades de reducción de la productividad.

¿Qué estrategias se deben de usar para minimizar los efectos no deseados?

Una opción para retrasar la evolución de malezas resistentes a imidazolinonas es rotar con cultivos como la soja dado que permite usar herbicidas con principios activos no usados en el cultivo de arroz. Otra es el uso de las tecnologías de arroz resistente a los inhibidores de la ACCasa que estará disponible en el corto plazo (RiceTec, BASF). Ambas opciones implican tratar toda el área con nuevos principios activos y/o sus mezclas. Hay una tercera opción que se puede usar para controlar escapes, confirmados o no que sean resistentes y que no necesita aplicaciones generalizadas en el área problema. Está operando en el país la aplicación dirigida por medio de drones aplicadores (UAV). Estos equipos generan planes de vuelo y de aplicación referenciados que nos permite retornar a los mismos sitios con precisión menor al centímetro cuando se cultive arroz nuevamente, otro cultivo, en el barbecho o se practique eventualmente la falsa siembra. Como el área tratada será muy pequeña, se podría aplicar herbicidas que, aunque dañen al arroz como por ejemplo glifosato + graminicida, reducirán la producción de semillas viables del arroz maleza o el capín, evitando cargar de semillas frescas al banco del suelo.

Para minimizar la acumulación de los residuos del imazapir + imazapic el primer factor a considerar es bajar la intensidad de uso del arroz CL. Lo segundo, si la historia del cultivo, el tipo de suelo y la ausencia de laboreo indican que se espera acumulación de residuos, se puede sembrar una pradera multi-especies con mayor proporción de trébol blanco y lotus que lo habitual, agregando una gramínea anual o perenne enseguida de la cosecha

y previa ruptura de taipas y realización de drenajes. Si la cantidad de residuos del herbicida acumulados es muy alta puede haber una reducción de la productividad inicial de la pastura del orden del 25%. Si se alterna arroz CL y un año de barbecho se recomienda pasarse al laboreo de verano, y se puede sembrar trébol persa en líneas en el otoño temprano dado que crece bien en presencia de los residuos y colabora con aportar de nitrógeno para el arroz siguiente.

CONCLUSIÓN

En resumen, queda claro que el arroz CL tuvo y tiene un importante papel a jugar en el control del arroz maleza y otras especies en las rotaciones con arroz en el país. Asimismo, ignorar las recomendaciones de uso de la tecnología posibilita que se presenten problemas aún más complejos de resolver, para los cuales la tecnología no fue creada, que necesitan nuevas soluciones con costos incrementales.

Esto subraya la necesidad de involucrar a todos los actores de la cadena productiva en un uso responsable de la tecnología en combinación con otras opciones de arroz resistente a herbicidas, rotación de pasturas y/o cultivos, y la aplicación sitio-específica con drones.

BIBLIOGRAFÍA

- Hensley, J. B.; Webster, E.P.; Blouin, D.C.; Harrell, D.L.; Bond, J. A.** 2013. Response of rice to Idrift rates of glyphosate applied at low carrier volumes. *Weed Technology*, 27(2):257–262. <https://doi.org/10.1614/WT-D-12-00061.1>
- Hensley, J.B.; Webster, E.P.; Blouin, D.C.; Harrell, D.L.; Bond, J.A.** 2012. Impact of drift rates of imazethapyr and low carrier volume on on-Clearfield rice. *Weed Technology*, 26(2):236–242. <https://doi.org/DOI: 10.1614/WT-D-11-00128.1>

- Leiva, F.; Zaldúa, F.** 2016. *Efecto de deriva de herbicida (imazapir + imazapic) en arroz no Clearfield*. Montevideo: UDELAR, FAGRO.
- Saldain, N.E.; Deambrosi, E.** 2005. Efectos de simulación de deriva del glifosato en El Paso 144. In: INIA Treinta y Tres. *Arroz: resultados experimentales 2004-2005*. Treinta y Tres: INIA. cap. 8, p. 25-29. (INIA Serie Actividades de Difusión; 418)
- Saldain, N.** 2007. Efectos de simulación de deriva del glifosato en El Paso 144. In INIA Treinta y Tres. *Arroz: resultados experimentales 2006-2007*. Treinta y Tres: INIA. cap. 5 p. 19-24. (INIA Serie Actividades de Difusión; 502)
- Walker, D. C.** 2018. *Utilizing enhanced acetolactate-synthase tolerant soybean to mitigate off-target deposition of penoxulam and bispyribac-sodium*. Mississippi: Mississippi State University. 61 p.

INIA Dirección Nacional

Avenida Italia 6201,
Ed. Los Guayabos,
Parque Tecnológico LATU.
Montevideo
Tel.: 2605 6021
inia@inia.org.uy

INIA La Estanzuela

Ruta 50, Km 11
Colonia
Tel.: 598 4574 8000
Fax: 598 4574 8012
iniale@le.inia.org.uy

INIA Las Brujas

Ruta 48, Km 10
Canelones
Tel.: 598 2367 7641
Fax: 598 2367 7609
inia_lb@lb.inia.org.uy

INIA Salto Grande

Camino al Terrible
Salto
Tel.: 598 4733 5156
Fax: 598 4732 9624
inia_sg@sg.inia.org.uy

INIA Tacuarembó

Ruta 5, Km 386
Tacuarembó
Tel.: 598 4632 2407
Fax: 598 4632 3969
iniatbo@tb.inia.org.uy

INIA Treinta y Tres

Ruta 8, Km 281
Treinta y Tres
Tel.: 598 4452 2023
Fax: 598 4452 5701
iniatt@tyt.inia.org.uy

www.inia.uy