

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
MINISTERIO DE AGRICULTURA

100 AÑOS DEL CULTIVO DE ARROZ EN CHILE

En un contexto internacional 1920 - 2020

TOMO II



EDITORES
MARIO PAREDES C.,
VIVIANA BECERRA V.,
GABRIEL DONOSO Ñ.



100 AÑOS DEL CULTIVO DE ARROZ EN CHILE En un contexto internacional 1920 - 2020 TOMO II

ISSN 0717-4713



COLECCION LIBROS INIA - 40

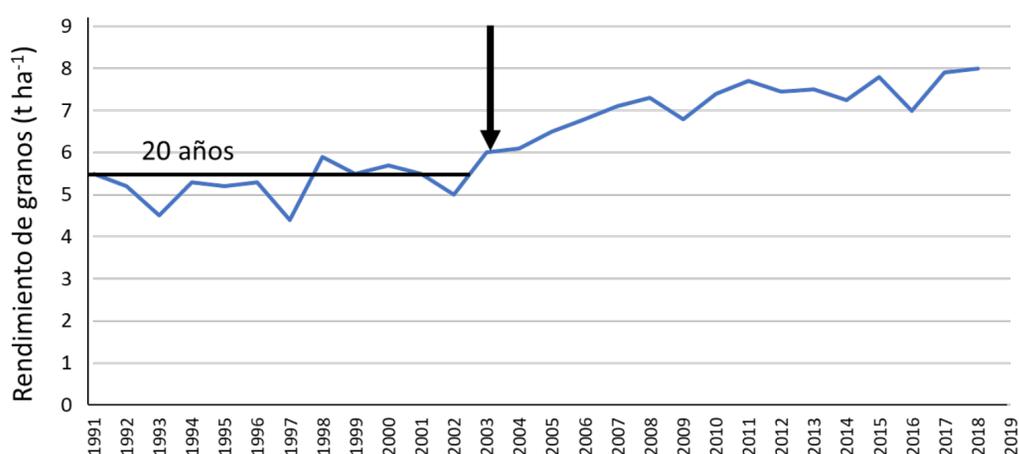
Capítulo 18. Manejo del arroz rojo a través de herbicidas imidazolinonas en cultivares resistentes en Brasil

Aldo Merotto Jr., Catarine Markus, André Andres, Germani Concenço

Los problemas relacionados con el arroz rojo (arroz maleza) ocurren prácticamente en todas las áreas del cultivo del arroz en el mundo. En Brasil, la tecnología Clearfield (variedades resistentes a herbicidas imidazolinonas) está en uso desde el año 2000. Durante este período ocurrieron grandes cambios en el manejo de las labores, rendimiento de grano y costos de la producción.

Antes de la tecnología Clearfield no existía la posibilidad de controlar el arroz maleza a través de herbicidas selectivos en el cultivo del arroz. En un período de 20 años, antes del inicio de la tecnología Clearfield, el rendimiento de arroz en el estado de Rio Grande do Sul (RS) era de aproximadamente $5,5 \text{ t ha}^{-1}$. Después del inicio de esta tecnología, el rendimiento tuvo incrementos continuos, alcanzando valores aproximados a $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ (Figura 1). Este aumento fue generado por el control del arroz maleza, lo que permitió el uso adecuado de las prácticas de manejo, como la época y densidad de siembra, junto con la posibilidad de usar mayores cantidades de fertilizantes, los cuales pudieron ser usados de forma más eficiente por el cultivo del arroz.

De esta forma, el manejo era realizado por medio de la preparación repetida del suelo con anterioridad a la siembra del cultivo, como una forma de disminuir la infestación. En las áreas infestadas con arroz maleza, este procedimiento resultaba en un atraso en la fecha de siembra, lo cual imposibilitaba un mejor uso de las condiciones ambientales para el cultivo del arroz, principalmente la radiación solar. Entretanto, con este procedimiento era común que se presentaran altas densidades de arroz maleza, aprovechándose de la fertilización aplicada al cultivo. En este período, el barbecho era utilizado como una forma de disminuir la infestación del arroz maleza; aun así, un gran número de áreas se declararon no aptas para el cultivo del arroz.



Fuente: IRGA, 2002.

Figura 1. Evolución del rendimiento de los arrozales en el estado de Rio Grande do Sul. La flecha indica el inicio en el uso de la tecnología Clearfield.

La ganancia del rendimiento de grano relacionada con la tecnología Clearfield fue, aproximadamente, de 2 t ha^{-1} en un área de 1,25 millones de ha de cultivo de arroz del estado de RS. De esta forma, se puede estimar que el control del arroz maleza a través de las variedades resistentes a herbicidas tuvo un incremento anual aproximado de \$ 500 millones de dólares en la agricultura de RS. Entretanto, la aparición paulatina de resistencia a los herbicidas en el arroz maleza, constituyó un problema para la mantención de este beneficio.

La presencia de arroz maleza resistente a herbicidas imidazolinonas (IMI) se constituyó como el principal problema de la tecnología Clearfield para las localidades donde este sistema de producción estaba en uso, y se recomendaba observar con especial atención en los lugares donde la utilización de variedades de arroz resistentes a herbicidas estaba comenzando. La persistencia de los herbicidas IMI en el suelo, también podría ser un problema de la tecnología Clearfield. La complejidad de la utilización de los herbicidas, en relación a la época y dosis de aplicación y variaciones asociadas al manejo del cultivo, también son aspectos importantes que deben ser considerados en el uso de herbicidas IMI en la tecnología Clearfield.

El objetivo de este capítulo es presentar los principales resultados de investigación y sus aplicaciones en relación a la ocurrencia de resistencia a herbicidas en arroz maleza, persistencia de herbicidas IMI en el suelo, y aspectos de manejo del cultivo de malezas asociados a la utilización de la tecnología Clearfield en Brasil.

Características relacionadas con la presencia de arroz maleza resistente a herbicidas imidazolinonas

Presencia de resistencia

Se realizó un estudio de larga duración basado en el monitoreo de la resistencia durante las temporadas 2006-2007 a 2011-2012, para evaluar la resistencia a imazetapir + imazapic en aproximadamente 1.000 poblaciones de arroz maleza colectadas en el estado de RS (Kalsing et al., 2019). En este estudio, la ocurrencia del arroz maleza resistente fue de 56 %, 73 %, 68 %, 76 %, 100 % y 100 %, entre las temporadas 2006 al 2012, mientras que el efecto medio de los herbicidas en estas evaluaciones fue de 40 %, 44 %, 28 %, 18 %, 16 % y 6 %. Se destaca que en todos los estudios de monitoreo de arroz maleza en RS, se utilizaron muestreos dirigidos a la posible presencia de resistencia a herbicidas en cultivos de arroz. Los resultados encontrados evidenciaron la gran frecuencia de arroz maleza resistente a herbicidas, con un aumento de los niveles de resistencia a lo largo de las temporadas evaluadas. La gran frecuencia de ocurrencia indicó la necesidad de desarrollar procedimientos para el diagnóstico de la resistencia de arroz maleza a herbicidas, principalmente a través de métodos convencionales o expeditos que proporcionen la adecuada toma de decisiones en actividades de manejo del cultivo.

Principales causas asociadas con la distribución de la resistencia

En un estudio realizado durante las temporadas 2006 a 2012, se encontró una adopción muy baja de prácticas agronómicas para minimizar la evolución y diseminación de resistencia a herbicidas en arroz maleza, especialmente en las regiones de la depresión central y en la frontera sur (Cuadro 1). La región de la depresión central se caracteriza por pequeñas áreas cultivadas, suelo pesado y de drenaje deficiente. Estas características dificultan la rotación de cultivos, lo que perjudica directamente el control del arroz maleza. Históricamente, el ´roguing` se utilizaba en esta región para su control.

Sin embargo, y por desgracia, la frecuencia de utilización de esta práctica disminuyó con la adopción del arroz Clearfield. Actualmente, debido a la gran frecuencia de arroz maleza resistente, la

práctica del ‘roguing’ está retornando en muchas labranzas del estado RS, incluso en áreas de media a gran extensión.

El arroz maleza resistente a IMI fue detectado, en promedio, después de 2,7 cosechas después del inicio del uso de variedades de arroz Clearfield (CL). Estos resultados indicaron que el problema del arroz maleza resistente a IMI ocurrió más temprano que en cultivos de arroz en el sur de U.S.A. (Burgos et al., 2008) e Italia (Busconi et al., 2012), donde fue identificado después de 5 años de uso comercial de la tecnología CL. En el sur de U.S.A. la rotación de cultivos es ampliamente utilizada y la adopción de semillas certificadas es alta (Ziska et al., 2015). Esta situación es diferente en el estado de RS, donde sólo 36 % de los agricultores utiliza rotación de cultivos y el uso de semillas certificadas es baja (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estimación de la adopción de prácticas agronómicas aplicadas al control del arroz maleza en arroz de riego, en diferentes regiones productoras de arroz en Rio Grande do Sul (RS), Brasil. Temporadas 2006 a 2012.

Región	(n)	Prácticas de manejo (%)			
		Semillas certificadas ^(1,2)	Control de escapes ^(1,3)	Maquinaria propia ⁽⁴⁾	Rotación de cultivo
Depresión central	8	0b	75ab	88	0
Planicie costera interna	3	25ab	75ab	33	33
Planicie costera externa	6	83a	33bc	100	17
Frontera sur	12	13b	20c	92	42
Frontera oeste	8	25ab	75ab	88	63
Zona Sur	3	67ab	100a	67	33
Estado	40	36	63	78	31

Fuente: Kalsing et al., 2019. ⁽¹⁾ Medias con la misma letra no difieren, test de Tukey, probabilidad de 5%. ⁽²⁾ Semilla certificada inspeccionadas por agencias reguladoras. ⁽³⁾ Control de escapes fue considerado como acciones de ‘roguing’. ⁽⁴⁾ Maquinaria sólo usada en el campo del agricultor.

Identificación de plantas de arroz maleza resistentes

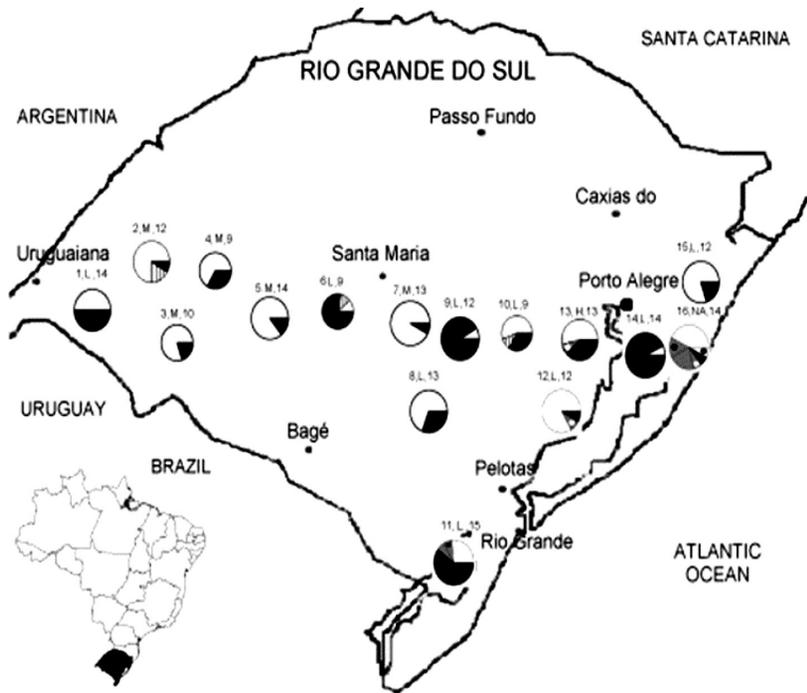
La rápida identificación de individuos resistentes es fundamental para el establecimiento de medidas de control más eficientes, destinadas a prevenir la distribución y a controlar individuos resistentes.

Los experimentos clásicos de identificación de resistencia relacionados con la aspersión del herbicida en el suelo o en las plantas demandan mucho tiempo y espacio para su ejecución, siendo onerosos y no expeditos; por lo que son poco apropiados para el análisis de un gran número de muestras. Enfoques más expeditos son necesarios para la identificación de biotipos resistentes. Es por ello que se realizaron bioensayos en tres etapas de desarrollo del ciclo del arroz: semillas, plántulas y macollas (Roso et al., 2010a).

Los estudios contemplaron el uso de SNP para detectar la mutación del gen *ALS* existente en poblaciones de arroz maleza e identificar molecularmente la resistencia (Roso et al., 2010b). Los resultados del estudio indicaron que la resistencia a los herbicidas IMI en las poblaciones de arroz maleza evaluadas se debe, en su mayoría, a la alteración del lugar de acción en la enzima ace-

tolactato sintasa (ALS), provocada por la mutación G654E. La elevada frecuencia de la mutación G654E en las poblaciones de arroz maleza resistentes, puede explicarse en función del gran uso de IRGA 422CL (variedad Clearfield de arroz utilizado en la época de realización del estudio) en las siembras de arroz, sugiriendo que el probable origen de resistencia se deba al flujo génico entre IRGA 422CL y el arroz maleza (Figura 2).

Estos procedimientos discriminaron de forma efectiva y rápida los individuos resistentes y susceptibles, siendo considerados técnicas expeditas para el diagnóstico de resistencia.

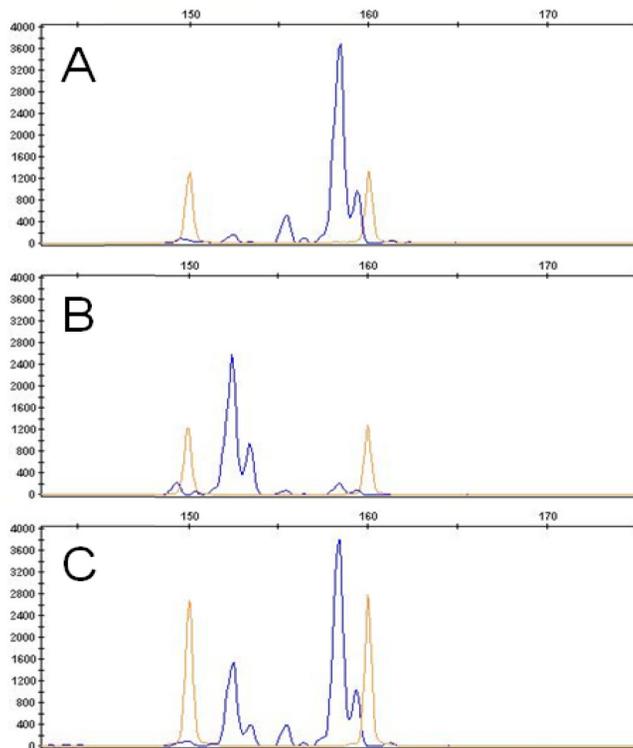


Fuente: Roso et al., 2010a.

Figura 2. Distribución de la frecuencia de alelos del gen ALS en arroz maleza. Los gráficos circulares indican el porcentaje de alelos ALS G654E (□), S653D (▨), A122T (■), G654E y A122T (▤), G654E y S653D (▧), G653E y A122T (▩), G654E, S653D y A122T (▪), y ninguno (■) Identificados a través de los marcadores SNP.

Origen de la resistencia

Como se muestra en el párrafo anterior, las mutaciones presentes en los genes ALS de los biotipos de arroz maleza resistentes encontrados en RS fueron, en su mayoría, iguales a los encontrados en las variedades usadas de arroz resistente (Roso et al., 2010a). Sin embargo, esta resistencia también se puede originar en procesos independientes de selección. Se realizó un análisis de paternidad por exclusión (Goulart et al., 2012a) en individuos de arroz maleza resistentes a IMI colectados en la temporada 2007/08, basado en marcadores SSR (Figura 3) (Goulart, 2011; Goulart et al., 2012b). Se analizaron 176 individuos provenientes de 15 poblaciones de arroz maleza desde las variedades 'IRGA 417', 'IRGA 422 CL', 'Puitá INTA CL' y 'SATOR CL', e híbridos obtenidos por cruzamientos artificiales entre estas variedades y cuatro biotipos de arroz maleza. El origen de la resistencia fue considerado como selección independiente cuando un individuo poseía solamente alelos típicos de arroz maleza y/o de la variedad IRGA 417. Se identificó que en el 98,9 % de los casos, la resistencia de arroz maleza a IMI se debía al flujo génico, y que en el 1,1 % la resistencia se debió a evolución independiente (Goulart et al., 2012b).



Fuente: Goulart, 2011.

Figura 3. Ejemplo de electroferograma del marcador microsatélite RM341, usando el procedimiento M13-tail. (A) Variedad 'IRGA 422 CL', (B) arroz maleza, y (C) híbrido de la variedad 'IRGA 422 CL' y arroz maleza. Las curvas en color naranja representan el marcador de tamaño ROX.

Variación de adaptación de los biotipos resistentes

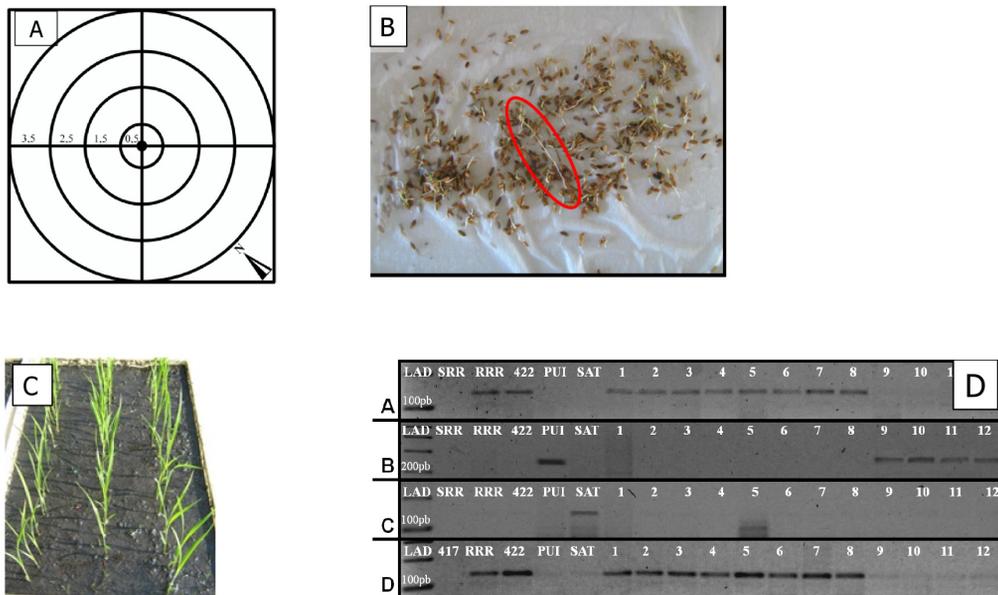
La variación de adaptación de individuos resistentes a herbicidas es importante, debido a la posibilidad de ocurrencia de alteraciones que resulten en la expansión o aumento de los perjuicios en las poblaciones que presentan esta característica. La resistencia a los inhibidores de ALS en arroz maleza puede tener otros efectos, además de la pérdida de eficiencia de control relacionados con la rápida germinación del biotipo resistente cuando es expuesto a baja temperatura, debido a la alteración de la reacción de la enzima (Dyer et al., 1993). Se realizaron estudios para evaluar si las alteraciones en el patrón de germinación de las variedades de arroces resistentes a herbicidas estaban relacionadas con las consecuencias de las mutaciones del gen *ALS*, o si obedecían al efecto de la variación ambiental de las localidades donde las semillas de estas variedades fueron producidas (Goulart et al., 2012a).

La variedad 'Puitá INTA-CL' germinó más rápidamente que 'IRGA 422 CL' e 'IRGA 417', principalmente, en evaluaciones realizadas 100 a 170 h después de la incubación de las semillas a 20 °C. La distinta velocidad de germinación entre variedades de arroz puede proporcionar alternativas de manejo del arroz maleza resistente que se origine por el flujo de alelos a partir de variedades resistentes. En este caso, los individuos resultantes de una germinación más rápida pueden presentar un mayor problema, debido a la mayor competencia relacionada con la rápida emergencia y el rápido crecimiento inicial. Alternativamente, este resultado puede representar una característica desfavorable al establecimiento de estos individuos resistentes, debido a la eliminación con mayor eficiencia, por el uso de prácticas de control realizadas en períodos anteriores al establecimiento del cultivo.

Flujo génico entre arroz cultivado y arroz maleza

El análisis del flujo génico en relación a la presencia de arroz maleza resistente a herbicida tiene implicancia en la tasa de hibridación entre el arroz maleza y el arroz cultivado, y la migración de alelos de resistencia entre poblaciones. Se realizó un estudio para cuantificar la ocurrencia de flujo génico a partir de arroz maleza resistente y de las variedades de arroz con diferentes alelos del gen *ALS*, como una forma de estimar los riesgos asociados a las diferentes variedades de arroz resistentes a herbicidas IMI (Goulart, 2011). En este estudio se evaluaron, aproximadamente, 1 millón de semillas en experimentos de campo, utilizando la metodología de círculos concéntricos (Figura 4A).

La presencia de resistencia en estas semillas fue evaluada a través de los métodos de imbibición de semillas, métodos moleculares SSR, y aspersion de herbicida (Figuras 4B y 4D). La ocurrencia de flujo génico para el arroz maleza susceptible fue de 0,034 % y para la variedad IRGA 417 fue de 0,014 % (Goulart, 2011). Las variedades de arroz evaluadas y el biotipo de arroz maleza resistente actúan de forma similar como donantes de polen, resultando en un flujo génico promedio de 0,024 %. Estos resultados indican que la eliminación de 'escapes' de arroz malezas no controlados en cultivos de variedades resistentes a herbicidas IMI es fundamental para la eliminación del riesgo de migración del gen de resistencia al arroz maleza.



Fuente: Goulart, 2011.

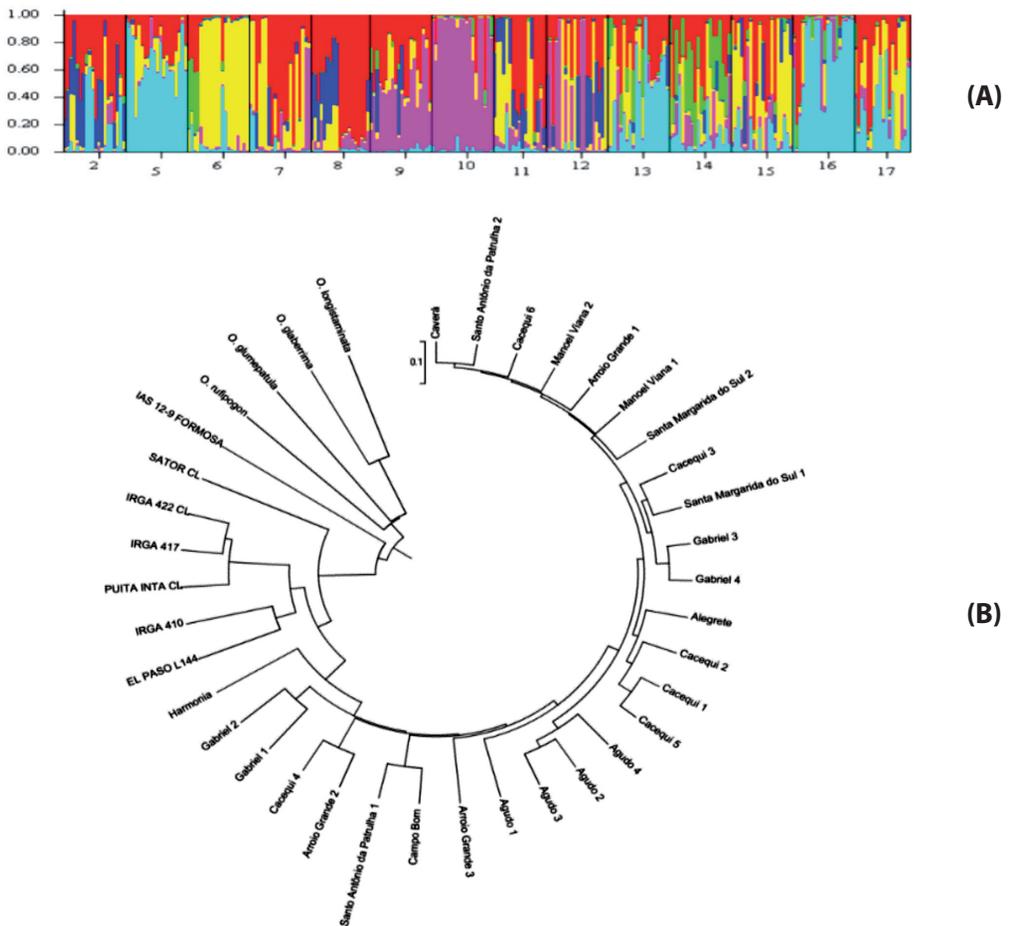
Figura 4. Representación de la identificación de plantas de arroz maleza resistentes a herbicidas imidazolinonas. (A) Diseño del experimento de campo, (B) evaluación de la imbibición de semillas, (C) crecimiento de plantas resistentes, (D) identificación de alelos de resistencia a través de marcadores moleculares SNP.

Diversas poblaciones de arroz maleza fueron identificadas como resistentes a herbicidas IMI en RS, tal como había sido descrito en los estudios anteriores. Se realizaron estudios de caracterización genética de poblaciones de arroz maleza de RS con sospechas de resistencia a los herbicidas IMI, como una forma de evaluar la estructura de estas poblaciones e identificar la ocurrencia de flujo génico de semillas entre diferentes localidades (Goulart, 2011). Los resultados demostraron que las poblaciones de arroz maleza de RS presentan una alta diversidad genética entre los individuos, aunque existe una considerable variación entre estas poblaciones en la media de los individuos. El análisis de la varianza molecular (AMOVA) indicó que la variación genética de las

534 accesiones de arroz maleza evaluadas, fue de 26 % entre poblaciones y de 74 % dentro de las poblaciones. Así, el valor del índice de fijación (F_{ST}) obtenido por AMOVA fue 0,26. Esto indica que la variabilidad genética en las poblaciones de arroz maleza está relacionada, sobre todo, a la diversidad dentro de cada población, en comparación con la variabilidad entre poblaciones. En poblaciones naturales de especies autógamas se espera una baja diversidad genética, debido al alto grado de homocigosis.

Sin embargo, al tratarse de poblaciones provenientes de áreas de cultivo, como el arroz maleza, la diversidad dentro de las poblaciones puede ser más elevada. Esto puede deberse a la selección impuesta por prácticas como el 'roguing' o a la migración de semillas entre poblaciones.

Los resultados observados confirman que el origen de resistencia a herbicidas en arroz maleza se debe, sobre todo, al flujo génico de semillas y polen. Sin embargo, también se identificaron poblaciones genéticamente aisladas. El sistema de análisis de la estructura de poblaciones utilizado en este estudio posibilitó la identificación del aislamiento genético y la intensidad de flujo génico en poblaciones de arroz maleza, como herramienta para el diagnóstico específico de poblaciones que presentaron aporte de semillas contaminadas de arroz maleza. Además, los resultados proporcionaron el diagnóstico de una mayor importancia del flujo génico, en detrimento de procesos independientes que dan origen a la resistencia a herbicidas en arroz maleza.



Fuente: Goulart, 2011.

Figura 5. (A) Representación de la variabilidad genética dentro y entre poblaciones de arroz rojo. (B) Dendrograma en base a marcadores moleculares SSR de poblaciones de arroz maleza, variedades y especies silvestres de arroz.

Importancia del manejo del cultivo en la sustentabilidad de dos métodos de control de arroz maleza

Los resultados presentados destacan la gran importancia de la sistematización de manejo del cultivo realizado por cada productor, en relación a la ocurrencia de flujo génico y resistencia a herbicidas en arroz maleza. En muchas áreas existen cultivos vecinos donde en un lado se tiene una labranza limpia de arroz maleza y otras malezas, mientras que en áreas adyacentes hay una alta infestación, resultando incluso en una inviabilidad productiva. Las evidencias presentadas indican que el sistema Clearfield, individualmente, no resuelve el problema de arroz maleza. Por ejemplo, en el estado de RS la gran herramienta para control de arroz maleza es el uso del sistema Clearfield y la rotación con soya.

Actualmente, un 90 % de las siembras en RS corresponden a cultivos Clearfield, y representan el área más importante del mundo con el uso de esta tecnología. Este mismo proceso se ha adoptado en los últimos años en el estado de Santa Catarina, Brasil. Los 15 años de utilización del sistema Clearfield en estas regiones han señalado que las prácticas de manejo del cultivo y de las malezas, como la adecuación de los sistemas de preparación del suelo y de riego, época de siembra, período de inicio del riego, rotación de cultivos, rotaciones, control de 'escapes' y utilización de semillas exentas de arroz maleza (certificadas), son y seguirán siendo herramientas altamente importantes en relación al control de arroz maleza.

Manejo de las malezas asociadas a la utilización de la tecnología Clearfield

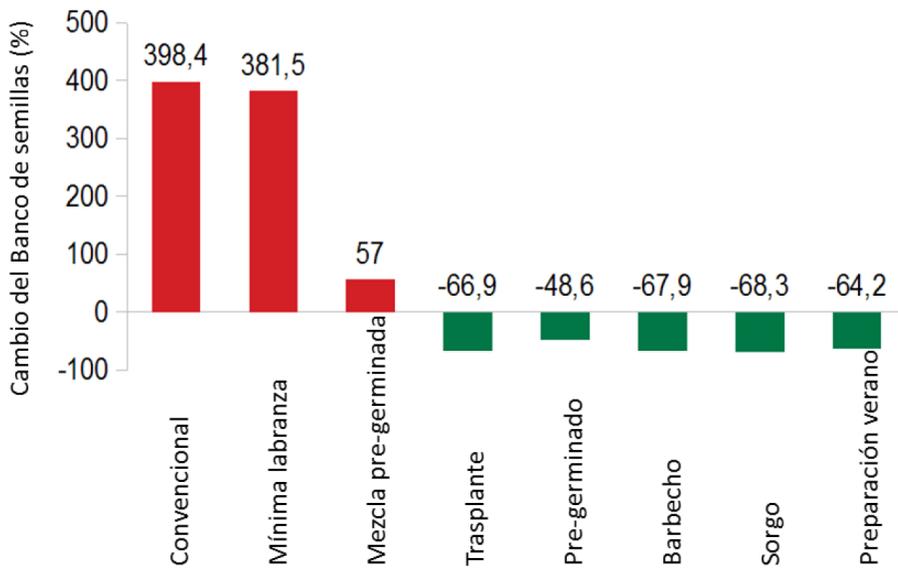
Sistemas de cultivo

El manejo o preparación del suelo consiste en un conjunto de operaciones realizadas para propiciar buenas condiciones de siembra, desarrollo de las plantas y la producción final. Entre los diversos objetivos para realizar la preparación del suelo, están la eliminación de malezas presentes en el área y el estímulo a la germinación de semillas presentes en el banco de semillas del suelo, para ayudar al éxito del establecimiento del arroz. Esta preparación del suelo puede ser inmediatamente antes de la siembra o temprano con barbecho en el verano, preparando la siembra de la siguiente cosecha (Figura 6). Normalmente se realiza una corrección del relieve a través de un rastraje (más tradicional) superficial del suelo o se procede a través de un proyecto de sistematización del suelo, con el uso de tecnologías más actuales utilizando satélites. Estos procedimientos contribuyen al mantenimiento de una lámina de agua homogénea que ayuda a reducir la emergencia de las malezas presentes en el cultivo del arroz de riego, entre ellas el arroz rojo.

Sistema convencional

En el sistema de cultivo convencional de preparación de suelo, el proceso se basa en la mecanización para alteraciones físicas, siendo necesario que esa preparación sea realizada con un contenido adecuado de agua, para evitar la realización de operaciones adicionales en el caso de suelos secos, o bien su deformación y formación de terrones en el caso de exceso hídrico.

La preparación convencional del suelo comienza en el otoño anterior a la siembra, con el desmanche de las taipas con lámina, arado o rejilla, siguiendo la preparación del suelo con arado de discos, de vertedera o incluso rejilla. La preparación normalmente finaliza con rastrajes de discos (rejilla niveladora). También es posible utilizar la rastra rotativa en la preparación convencional, lo que ayuda a la eliminación de los primeros flujos de arroz rojo antes de la siembra del arroz.



Fuente: Avila et al. (1998).

Figura 6. Cambios en el número de granos de arroz rojo (%) (*Oryza sativa*) en el banco de semillas del suelo, en respuesta a sistemas de utilización de áreas de tierras bajas.

Plantación directa / cultivo mínimo

Debido a la mayor desestructuración y pérdida por procesos erosivos ocasionados por la preparación convencional del suelo en áreas tropicales y subtropicales, los sistemas conservacionistas están siendo adaptados para el manejo del suelo en esas regiones edafoclimáticas. Aunque estos sistemas presentaron algunos obstáculos para el productor rural de arroz de Rio Grande do Sul, al final comprendieron que el problema de la infestación con arroz rojo sería cada vez más grave si es que no adoptaban los sistemas alternativos de manejo de esas malezas, lo que llevó a la amplia adopción, en un corto período, de los sistemas de siembra directa o de cultivo mínimo en ese estado brasileño.

La siembra directa y el cultivo mínimo adoptados en áreas de inundación cultivadas con arroz, difieren de aquellos adoptados en cultivos de tierras altas (soya y maíz, por ejemplo) en cuanto al objetivo inicial, tipo de suelo, compactación, diversificación de especies cultivadas y continuidad del sistema productivo.

Aunque en áreas de arroz de riego la siembra directa se adopta sólo en pequeñas áreas (previo rastraje del suelo 30 a 60 d antes de la siembra - cultivo mínimo), su adopción a las áreas de arroz contribuye a la reducción de la infestación de arroz rojo en el cultivo del arroz. Ambos sistemas incluyen una preparación ligera del suelo, en el otoño o el verano anterior (siembra directa) o en la primavera antes de la siembra (cultivo mínimo), donde algunos flujos de arroz rojo son estimulados por esas operaciones, con posterior eliminación química o mecánica.

Además de la eliminación química o mecánica de los flujos de emergencia del arroz rojo, la utilización del área para la ganadería proporciona diversos efectos que atenúan la ocurrencia del arroz rojo, como el pastoreo y el propio pisoteo de los animales en el área. Asociado a la presencia de los animales, la siembra en áreas de arroz de pastos de invierno como trébol, también ayuda a inhibir la presencia de arroz rojo.

Pre-germinado

El alto costo de producción y la baja rentabilidad del cultivo del arroz en el estado brasileño de Santa Catarina, hizo que los productores de arroz optaran por otro sistema de cultivo que tiene un manejo más laborioso, pero que posibilita el control cultural de buena parte de las malezas. Es innegable que el principal objetivo del uso del sistema de semillas pre-germinadas fue la supresión del arroz rojo, entre otras ventajas. El sistema de cultivo pre-germinado consiste, brevemente, en el establecimiento de tableros o cuadros de cultivo con cota cero, donde prácticamente toda la preparación del suelo y todo el cultivo del arroz se hace con la presencia de la lámina de agua, lo que constituye una barrera física al establecimiento de las malezas, siendo eficiente en la inhibición del arroz rojo.

Aunque el sistema de cultivo pre-germinado es eficiente en la inhibición de las malezas, en algunos casos se puede aplicar herbicidas con un adecuado manejo mecánico asociado al manejo del agua. En la mayoría de los casos, la asociación de este sistema con la aplicación de herbicidas, promueve los mejores resultados de control del arroz rojo.

Una práctica en desuso, debido al riesgo de contaminación de áreas, consistía en bajar la lámina de agua temporalmente, antes de sembrar el arroz, para estimular un flujo de emergencia del arroz rojo y otras malezas. Cuando estas plántulas estaban al estado de 2 a 3 hojas, el agua era restablecida y se aplicaba un herbicida que actuara sobre arroz rojo y otras malezas. Así, antecediendo la siembra del arroz con semillas pre-germinadas, el agua era drenada del cuadro, para posteriormente regar y sembrar. Esta práctica colaboraba en eliminar los primeros flujos de emergencia de las malezas.

En general, después de la siembra se espera que las plantas del arroz alcancen 3 a 4 hojas para, si es necesario, se usen los herbicidas en post-emergencia, en aplicación directa a la lámina de agua del cultivo.

Trasplante de arroz

En cuanto al manejo del arroz rojo, el sistema de trasplante de arroz se asemeja al cultivo pre-germinado, donde el área se mantiene con una lámina de agua, con la diferencia de que las semillas son germinadas, las plantas son establecidas en viveros y, posteriormente trasplantadas en el terreno inundado y preparado, ya sea de forma manual o con uso de máquinas trasplantadoras.

Además de la ventaja de eliminar el arroz rojo antes de la siembra y de su inhibición por la presencia de la lámina de agua, como también ocurre en el sistema pre-germinado, en el sistema de trasplante el tamaño de las plántulas inhibe, por competencia, las plantas de arroz rojo que puedan emerger entre hileras debido a su menor tamaño.

Rotación de cultivos

Las áreas de tierras bajas del sur de Brasil se cultivan con arroz en verano y, normalmente, se mantienen en barbecho el resto del año. Los residuos del cultivo ayudan en la inhibición de las malezas, pero ese efecto es más pronunciado cuando se cubre con alguna cobertura de invierno. En ese contexto, la rotación de cultivos ayuda en el manejo de las especies invasoras y también en la maximización de la cobertura vegetal en el área.

Los estudios muestran que el banco de semillas de malezas en áreas de arroz es menor, cuando se adoptan sistemas de rotación de cultivos con el arroz. Además, la rotación afecta también a la composición de la comunidad de las malezas. Aunque se conocen los beneficios de la rotación del arroz con leguminosas, en las tierras bajas el exceso hídrico es una gran limitante para su establecimiento, ya que las leguminosas como la soya no pueden soportar largos períodos de inundación.

Los cultivos de verano, como el maíz, el sorgo y la soya son opciones para la rotación de cultivos con el arroz de riego en las tierras bajas. La adaptabilidad del maíz es muy limitada en estos suelos, debi-

do a su mayor sensibilidad al exceso hídrico y a las restricciones impuestas por las características del suelo. El sorgo, por otro lado, se adapta mejor a las tierras bajas, al ser más tolerante al exceso hídrico, produciendo un gran volumen de biomasa; al asociarse esa cobertura vegetal (con herbicida) al pastoreo animal, se logran altos índices de eliminación del arroz rojo.

La soya, probablemente, es el cultivo más prometedor para la rotación con arroz de riego en las tierras bajas, ya que permite el manejo de las malezas del arroz, particularmente del arroz rojo, por la rotación de herbicidas durante su cultivo, y porque tiene garantizado su valor en el mercado. La viabilidad de la rotación arroz-soya depende de los resultados de investigación que generen prácticas de manejo del suelo, y del exceso hídrico en esas áreas, con el fin de hacerlas adecuadas al cultivo de la soya.

El éxito de la rotación arroz-soya en la inhibición de las malezas depende del sistema de cultivo y de la inclusión de los herbicidas indicados, pues cuando el manejo no está bien hecho, la ocurrencia de arroz rojo puede eventualmente agravarse.

Un estudio probó estrategias con herbicidas (pre y/o post-emergentes) aplicados a la soya, en el control de las malezas del arroz, como el arroz rojo, hualcacho y *U. plantaginea* (Figura 2). Entre otros resultados, el uso exclusivo de aplicación tardía del herbicida post-emergente Clethodim presentó bajos niveles de control de hualcacho y arroz rojo que fueron bien controlados por las aplicaciones de Glifosato en post-emergencia (sobre soya con tecnología Roundup Ready®). La aplicación única de S Metolachlor controló más del 80% de las tres especies de malezas evaluadas (Figura 7). Además de los tratamientos que utilizan la asociación del pre y de post-emergentes, evidenciaron un adecuado control de las especies estudiadas. Esto contribuye a afirmar que el uso de herbicidas pre-emergentes es importante para, al menos, retardar la aparición de biotipos de arroz rojo y de otras especies de malezas, con resistencia a los herbicidas post-emergentes.

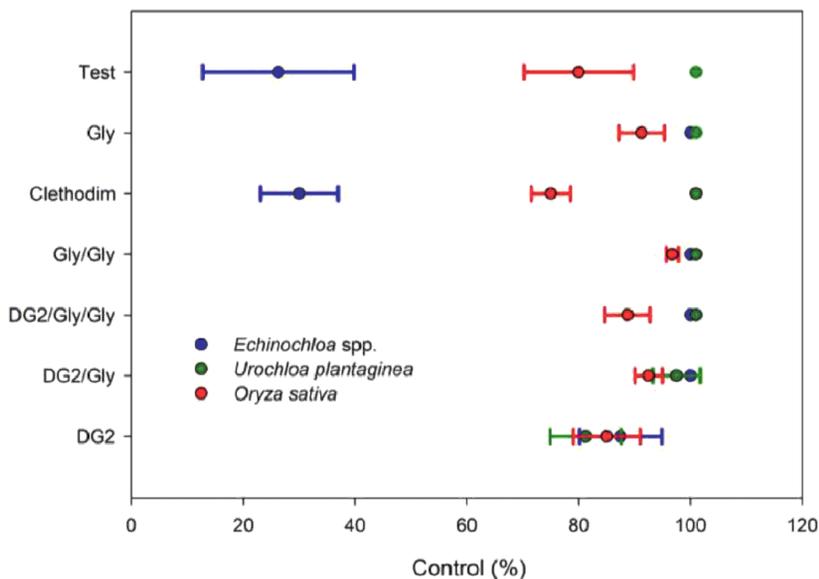


Figura 7. Control de hualcacho (*Echinochloa* spp.), papua (*Urochloa plantaginea*) y arroz rojo (*Oryza sativa*) con diferentes herbicidas, considerando la rotación arroz-soya. Gly = una aplicación en post-emergencia de glifosato 1.080 g i.a ha⁻¹; Clethodim = una aplicación post-emergencia de 144 g ha⁻¹ de clethodim; Gly / Gly = dos aplicaciones en post-emergencia de glifosato 1.080 g i.a ha⁻¹; DG2 / Gli / Gli = una aplicación en pre-emergencia de S Metolachlor seguida por dos aplicaciones de glifosato; DG2 / Gli = una aplicación en pre-emergencia de S Metolachlor seguida de una aplicación de glifosato; DG2 = una aplicación en pre-emergencia de S Metolachlor. Tratamiento comparado con el intervalo de confianza del promedio al 95 %.

Manejo del agua

El manejo del agua es una importante herramienta para el control del arroz rojo y de otras malezas, pues sirve como barrera al inicio de la germinación, tanto en el sistema convencional de cultivo como en la siembra directa, cultivo mínimo, pre-germinado o trasplante de plántulas.

En el sistema de cultivo convencional y en la siembra directa, la entrada de agua en la labranza debe ocurrir lo más rápido posible después de la emergencia del arroz y la aplicación de los herbicidas post-emergentes, y debe ser mantenida durante todo el ciclo del cultivo para evitar nuevos flujos de emergencia de arroz rojo. El efecto del sistema de riego de la labranza sobre la infestación de arroz rojo se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Efecto del manejo de agua de riego sobre la infestación de arroz rojo en un cultivo comercial de arroz.

Manejo de agua	Arroz rojo	
	Plantas m ⁻²	Panículas m ⁻²
Riego tardío	296	380
Riego intermitente	38	123
Riego continuo	11	59

Fuente: Noldin, 1988.

Arranque

El 'rouging' (arranque) es una técnica que consiste en la remoción manual de las plantas o panículas de arroz rojo desde el cultivo, basándose en las diferencias morfológicas entre las plantas. Es una práctica complementaria importante que es utilizada por pequeños productores, principalmente en la región Central del Estado de Rio Grande do Sul, pero con buena aceptación por productores, incluso en áreas de mayor cultivo. A cada cosecha se le pueden realizar varios 'rouging'; sin embargo, con la aparición de plantas de arroz rojo similares morfológicamente a las plantas de arroz cultivado, esta práctica está teniendo mayores dificultades.

Barra química

El control del arroz rojo, utilizando un herbicida sistémico de acción total a través de la 'barra química', es una técnica desarrollada para la eliminación de las plantas de arroz rojo existentes en la siembra después de la emergencia del arroz. Para ello, es fundamental la diferencia de estatura entre las plantas de arroz cultivado y del arroz rojo. La técnica consiste en empapar la cuerda de la barra con el herbicida y desplazarse en el cultivo, haciendo que las plantas de arroz rojo entren en contacto con el producto. La operación tiene por objeto evitar la re-infestación del área, y puede ser una opción interesante para pequeñas propiedades. Este método, además de ser arduo para el productor, presenta algunas desventajas como: no alcanza el arroz rojo producto de la hibridación con arroz cultivado (menor altura), haciendo que ocurra una presión de selección de plantas más bajas, lo que aumenta la importancia de este tipo de arroz rojo en la población.

Barbecho

El barbecho es utilizado por los productores de arroz de riego que tienen más área disponible que la cultivada, para mantener el arroz rojo en niveles tolerables. Como se advierte en la Figura

1, Avila et al. (1998) mostraron que el barbecho reduce en torno al 60 % el número de semillas de arroz rojo en el banco del suelo, en comparación con suelo removido. El barbecho de un sólo año (Petrini et al., 1998) no es suficiente para reducir la aparición de arroz rojo, indicándose por lo menos dos años de descanso por área.

Existe la necesidad de mayores evaluaciones para esclarecer el efecto del barbecho del área, integrado o no con la ganadería, sobre la reducción de la presencia del arroz rojo. Algunos resultados indican que el pisoteo animal no tiene efecto sobre la pérdida de viabilidad de las semillas de arroz rojo en el banco del suelo, pero el pastoreo evita el crecimiento y la producción de semillas de las plantas, lo que es beneficioso al sistema productivo (Gomes y Magalhães, 2004).

Preparación anticipada

La preparación temprana del suelo, poco después de la cosecha del arroz, favorecería la descomposición de la paja, además de corregir ondulaciones producidas por la cosechadora y otras máquinas utilizadas en la cosecha del arroz. También facilitaría las labores de preparación de suelo anteriores a la fecha de siembra de la siguiente temporada (SOSBAI, 2018).

Además de estas funciones, la preparación temprana del suelo también facilita el manejo del banco de semillas de arroz rojo. En este sentido, Masoni et al. (2013) evaluaron diversos sistemas de preparación temprana del suelo como el uso de lámina de agua permanente, incorporación de la paja en suelo seco o con agua y uso de rodillo-cuchillo. Estos autores concluyeron que el tratamiento más eficiente en la reducción del banco de semillas del arroz rojo fue la preparación después de la cosecha con suelo inundado, pues actúa en la reducción de la dormancia, aumento de semillas inviables y estímulo a la germinación. El rodillo, por ejemplo, permitió incorporar superficialmente la paja, actuando sobre el quiebre de la dormancia, la inviabilidad y el estímulo a la germinación de las semillas de arroz rojo (Cuadro 3).

Cuadro 3. Porcentaje de semillas de arroz rojo en dormancia en la capa de 0-10 cm de profundidad, bajo diferentes manejos de post-cosecha del área, 120 d después de la aplicación de los tratamientos.

Tratamiento	Semillas viables (%)
Lámina de agua	46 a
Preparación pos-cosecha con suelo seco	29 b
Preparación post-cosecha con suelo inundado	29 b
Preparación de suelo seco en julio	39 ab
Preparación post-cosecha con suelo inundado + preparación de suelo seco en julio	37 ab
Preparación post-cosecha en julio con suelo seco	32 b
Sin preparación del suelo	40 ab

Fuente: Massoni et al., 2013. Las medias seguidas por la misma letra no difieren por la prueba de Tukey al 5 % de probabilidad.

Punto de aguja

Para cultivos de arroz con resistencia de arroz rojo u otras especies de malezas a los herbicidas inhibidores de la enzima ALS, una importante estrategia es la aplicación de glifosato, sólo o en

mezcla con clomazone o pendimetalina, en estado llamado 'punto de aguja'. Esto asegurará la emergencia del cultivo de arroz en áreas sin infestación de esas especies. La etapa de 'punto de aguja' se considera como el momento inmediatamente anterior a la emergencia del arroz, normalmente indicado por la presencia de unas pocas plántulas de arroz ya germinadas. El herbicida debe aplicarse el mismo día en que el 'punto de aguja' es constatado (Andres et al., 2013).

Manejo del suelo entre temporadas

La literatura indica que después de la cosecha del arroz el suelo no debe ser removido, pues las semillas de arroz rojo, localizadas hasta 5 cm de profundidad en el suelo, pierden la viabilidad en menos de 17 meses, mientras que en aquellas semillas ubicadas a 25 cm de profundidad, algunos biotipos son capaces de mantener la viabilidad por más de 24 meses (Gomes y Magalhães Jr., 2004). Petrini et al. (1998) obtuvieron una reducción del 74 % en el banco de semillas de arroz rojo en los primeros 5 cm de suelo, en el área bajo barbecho en el período de mayo a octubre. Esto ilustra que el hecho de no mover el suelo después de la cosecha, por sí solo, constituye una alternativa para el manejo del arroz rojo.

Por otro lado, un gran número de productores de arroz de riego en Rio Grande do Sul incorporan el rastrojo del arroz después de la cosecha, lo que estimula la emergencia de arroz rojo, exigiendo una operación adicional de control que puede ser una nueva preparación del suelo, o la aplicación de herbicida de acción total.

Cuando el área es utilizada para alimentación animal en este período, se recomienda aumentar el número de animales para evitar la producción de propágulos y, en caso de que los bovinos consuman estas plantas con granos, lo recomendado es que el transporte de animales entre áreas sea controlado. Estudios recientes con alimentación animal con granos de pasto rojo, evidencian la necesidad de un período de cuarentena superior a 6 d (SOSBAI, 2018; Viero et al., 2018).

Retrospectiva de la tecnología de arroz tolerante a los herbicidas inhibidores de la enzima ALS en uso en las labranzas de arroz del sur de Brasil

El uso de plantas mutadas (no OMG) con el gen de tolerancia a herbicidas no selectivos al arroz, es considerado una tecnología innovadora en el control de malezas que facilitó el control selectivo de arroz rojo (Burgos et al., 2008). En el caso de los cultivos de arroz, en el sur de Brasil (Merotto et al., 2016) se observó un aumento de 2,5 t ha⁻¹ en el rendimiento de granos de arroz. El uso de la tecnología Clearfield® (CL) en el sur de Brasil comenzó en 2002. Diez años después, más del 60 % del área estaba utilizando esa tecnología para el manejo del arroz rojo, con niveles de control superiores al 95 % (Andres et al., 2013).

Actualmente, los herbicidas registrados en esta tecnología corresponden a las mezclas formuladas imazethapyr + imazapic e imazapyr + imazapic. Aisladamente, el herbicida imazethapyr ha sido también adoptado por los productores. El registro de los productos, indica una aplicación en pre-emergencia, seguida de una en post-emergencia, previo al riego.

Esta tecnología proporcionó beneficios inmediatos en cuanto a la eficiencia y facilidad de control del arroz rojo. Debido, principalmente, a fallas en la aplicación de la tecnología, fuera de las indicaciones técnicas, surgieron biotipos de arroz-rojo resistentes a los inhibidores de la enzima ALS, apenas cuatro años después de la introducción de la tecnología en el cultivo del arroz de la región, que acabaron dispersándose hacia otras regiones del Estado de Rio Grande do Sul.

Los productores de arroz y quienes proporcionan la asistencia técnica están tomando medidas adicionales para el manejo de este problema, con rotación de cultivos y diversos mecanismos de acción de los herbicidas, para reducir las pérdidas de productividad ocasionadas por el arroz rojo y otras malezas resistentes a herbicidas en los cultivos de arroz del sur de Brasil. Los estudios

muestran índices de control eficientes de las malezas asociados al uso de herbicidas de diferentes mecanismos de acción (Cuadro 4).

Cuadro 4. Control de arroz rojo en arroz de riego a pre-cosecha y productividad de granos (cv. BRS A701 CL). Embrapa, Capão do Leão, RS, 2018.

Tratamientos		Control pre-cosecha (%)	Productividad (kg ha ⁻¹)
PRE (g ha ⁻¹)	POS (g ha ⁻¹)		
Testigo s/ control		0	2102,1 B ²
Clomazone, 252	Propanil, 1800 + imazethapyr, 159	100,0 ^{ns}	9609,4 A
Clomazone, 252	Propanil, 1800 + imazapyr+ imazapic, 73,5+24,5	99,5	9158,1 A
Clomazone, 252	Propanil, 1800 + imazethapyr, 159 + clomazone, 252	100,0	10275,9 A
Clomazone, 252 + imazethapyr, 159	Propanil, 1800+ imazethapyr, 159	100,0	9805,5 A
Clomazone, 252 + imazapyr+ imazapic, 73,5+24,5	Propanil, 1800 + imazapyr+ imazapic, 73,5+24,5	99,8	9836,7 A
Coeficiente de variación (%)		1	15,30

¹ Aplicación punto de aguja (adicional glifosato, 1080 g i.a ha⁻¹).

² Letras distintas mayúsculas, por columna difieren entre sí, test de Duncan (p< 0,05).

^{ns} No significativo, en la columna, cuando se compararon los tratamientos herbicidas, test de Duncan (p< 0,05).

Referencias

- Andres, A., Theisen, G., Concenço, G., et al. 2013. Weed resistance to herbicides in rice fields in Southern Brazil. In: Price, A.J., Kelton, J.A. (eds.) *Herbicides*. IntechOpen. doi:10.5772/55947.
- Avila, L.A., Marchezan, E., Coradini, J.Z., et al. 1998. Controle do arroz-daninho: sistemas de cultivo de arroz irrigado, rotação de culturas, pousio do solo e preparo de verão. p. 12-16. In Marchezan, E. (ed.) *Sistema várzea: propostas de manejo*. Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (FATEC), Santa Maria, Río Grande do Sul, Brasil.
- Burgos, N.R., Korsworthy, J.K., Scott, R.C., et al. 2008. Red rice (*Oryza sativa*) status after 5 years of imidazolinone-resistant rice technology in Arkansas. *Weed Technol.* 22:200-208.
- Busconi, M., Rossi, D., Lorenzoni, C., et al. 2012. Spread of herbicide-resistant weedy rice (red rice, *Oryza sativa* L.) after 5 years of Clearfield rice cultivation in Italy. *Plant Biol.* 14:751-759.
- Dyer, W.E., Chee, P.W., Fay, P.K. 1993. Rapid germination of sulfonyleurea-resistant *Kochia scoparia* L. accessions is associated with elevated seed levels of branched chain amino acids. *Weed Sci.* 41:18-22.
- Gomes, A.S., Magalhães Jr., A.M. 2004. *Arroz irrigado no sul do Brasil*. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, Brasil.

- Goulart, I.C.G.R. 2011. Fluxo gênico e variação adaptativa de arroz daninho (*Oryza sativa* L.) resistente a os herbicidas imidazolinonas. Dissertação de mestrado (PPG Fitotecnia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Goulart, I.C.G.R., Matzenbacher, F.O., Merotto, Jr., A. 2012a. Differential germination pattern of rice cultivars resistant to imidazolinone herbicides carrying different acetolactate synthase gene mutations. *Weed Res.* 52:224-232.
- Goulart, I.C.G.R., Pacheco, M.T., Nunes, A.L., et al. 2012b. Identification of origin and analysis of population structure of field-selected imidazolinone-herbicide resistant red rice (*Oryza sativa*). *Euphytica* 187:437-447.
- IRGA. 2002. O arroz na conjuntura. *Boletim do IRGA* 1(1):1-4.
- Kalsing, A., Goulart, I., Mariot C., et al. 2019. Spatial and temporal evolution of imidazolinone-resistant red rice in "Clearfield" rice cultivations. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília 54:e00215.
- Massoni, P.F.S., Marchesan, E., Grohs, M., et al. 2013. Influência de manejo pós-colheita do arroz irrigado sobre o banco de sementes de arroz-vermelho. *Planta Daninha* 31:89-98.
- Merotto Jr.A., Goulart, I.C.G.R., Nunes, A.L., et al. 2016. Evolutionary and social consequences of introgression of nontransgenic herbicide resistance from rice to weedy rice in Brazil. *Evol. Appl.* 9:837-846.
- Noldin, J.A. 1988. Controle de arroz-daninho no sistema de semeadura em solo inundado. *Lavoura Arrozeira* 41(377):11-13.
- Petrini, J.A., Franco, D.F., Tavares, W. 1998. Germinação e viabilidade de sementes de arroz-daninho (*Oryza sativa*) em solo cultivado com arroz irrigado no sistema convencional. p. 373-376. In *Reunião Nacional de Pesquisa de Arroz, Goiânia, Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (CNPAP), Goiânia, Goiás, Brasil.*
- Roso, A.C., Merotto, Jr.A., Delatorre, C.A. 2010b. Bioensaios para diagnóstico da resistência aos herbicidas imidazolinonas em arroz. *Planta Daninha* 28:411-419.
- Roso, A.C., Merotto, Jr.A., Delatorre, C.A., et al. 2010a. Regional scale distribution of imidazolinone herbicide-resistant alleles in red rice (*Oryza sativa* L.) determined through SNP markers. *Field Crops Res.* 119:175-182.
- Roso, A.C., Merotto, Jr.A., Delatorre, C.A. 2010b. Bioensaios para diagnóstico da resistência aos herbicidas imidazolinonas em arroz. *Planta Daninha* 28:411-419.
- SOSBAI. 2018. Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. Sociedade Sul-Brasileira do Arroz Irrigado (SOSBAI), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Viero, J.L.C., Schaedler, C.E., Azevedo, E.B de., et al. 2018. Endozoochorous dispersal of seeds of weedy rice (*Oryza sativa* L.) and barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli* L.) by cattle. *Ciência Rural* 48(8):1-6.
- Ziska, L., Gealy, D.R., Burgos, R., et al. 2015. Weedy (red) rice: An emerging constraint to global rice production. *Adv. Agron.* 129:181-228.