



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Efecto residual de herbicidas imidazolinonas en la emergencia y desarrollo inicial de especies forrajeras sembradas en sistemas arroz-ganadería

Valentina Rodríguez de Barbieri

Maestría en Ciencias Agrarias

Opción Ciencias Vegetales

Noviembre, 2025

**Efecto residual de herbicidas
imidazolinonas en la emergencia y
desarrollo inicial de especies forrajeras
sembradas en sistemas arroz-ganadería**

Valentina Rodríguez de Barbieri

Maestría en Ciencias Agrarias
Opción Ciencias Vegetales

Noviembre, 2025

Esta tesis de maestría se distribuye bajo licencia
Creative Commons **reconocimiento – no comercial – sin obra derivada.**



Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. (PhD.) Rafael Reyno, Ing. Agr. (PhD.) Juana Villalba, Ing. Agr. (PhD.) Álvaro Roel el 20 de noviembre de 2025. Autora: Ing. Agr. Valentina Rodríguez de Barbieri. Director: Ing. Agr. (PhD.) Tiago Kasparý. Codirector: Ing. Agr. (PhD.) Rodrigo Zarza.

Agradecimientos

A mis tutores, el Ing. Agr. (PhD.) Tiago Edu Kaspary y el Ing. Agr. (PhD.) Rodrigo Zarza, por brindarme la oportunidad y confiar en mí para llevar adelante este trabajo.

A la Facultad de Agronomía y al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), por permitirme desarrollar mis estudios de posgrado.

Al equipo de pasturas de INIA La Estanzuela e INIA Treinta y Tres, por el apoyo tanto en el laboratorio para el desarrollo de los bioensayos como en el campo para los muestreos de suelo.

A los técnicos de INIA Treinta y Tres, por los valiosos consejos brindados durante estos años de trabajo, institución de la que me siento parte.

A los Ing. Agr. (PhD.) Rafel Reyno, Juana Villalba y Álvaro Roel, por integrar del tribunal de evaluación.

Y una mención especial a mi familia y amigos, quienes fueron los pilares fundamentales en todo el proceso.

Tabla de contenido

	página
Página de aprobación.....	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VIII
Summary.....	IX
1. <u>Introducción</u>	1
1.1. Rotación arroz-pasturas	1
1.1.1. <u>Especies forrajeras utilizadas en sistemas arroz - pasturas</u>	2
1.2. Arroz tolerante a imidazolinonas	3
1.3. Familia de las imidazolinonas	5
1.3.1. <u>Mecanismo de acción</u>	5
1.3.2. <u>Degradación y persistencia en el suelo</u>	6
1.3.3. <u>Efecto residual en especies susceptibles</u>	9
1.4. Bioensayos	11
1.5. Objetivos e hipótesis	12
2. <u>Residual Effect of Imidazolinone Herbicides on Emergence and Early Development of Forages Species in Rice-Livestock Systems</u>	14
2.1. Resumen	14
2.2. Summary	15
2.3. Introduction	16
2.4. Materials and Methods	17
2.4.1. <u>Soil Origin and Sampling</u>	17
2.4.2. <u>Soil Characterization</u>	19
2.4.3. <u>Experimental Design of the Bioassays</u>	20
2.4.4. <u>Statistical Analysis</u>	21
2.5. Results and Discussion	22

2.5.1. <u>Plant Response Variables</u>	22
2.5.2. <u>Multivariate Analysis</u>	32
2.6. Conclusions	36
2.7. Supplementary Materials	37
2.8. References	42
 3. <u>Discusión y conclusiones generales</u>	 48
 4. <u>Bibliografía</u>	 51

Resumen

En Uruguay, los sistemas arroz-ganadería se caracterizan por la integración de pasturas en rotación con el cultivo de arroz (*Oryza sativa*). En este contexto, los herbicidas del grupo de las imidazolinonas (IMI) constituyen la principal estrategia para el control de arroz maleza (*Oryza* spp.) en variedades de arroz tolerante a IMI. La vida media de imazapic e imazapyr puede superar los cien días en el suelo, lo que podría comprometer la emergencia y desarrollo inicial de pasturas utilizadas en la rotación. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto residual de herbicidas imazapyr + imazapic aplicados en arroz tolerante a IMI sobre la emergencia y el desarrollo inicial de especies forrajeras sembradas en rotaciones arroz-pasturas. Durante los años 2021, 2022 y 2023, se realizaron bioensayos en invernáculo utilizando suelos de Treinta y Tres, Río Branco y Tacuarembó, colectados a dos profundidades (0-15 y 16-30 cm) y con diferente historial de uso de IMI (control: sin aplicación; IMI-1: 17 meses desde la última aplicación; IMI-2: 5 meses desde la última aplicación). En cada muestra de suelo se determinaron carbono orgánico (%), pH y textura. Sobre seis especies forrajeras (*F. arundinacea*, *L. multiflorum*, *L. perenne*, *T. repens*, *T. pratense*, *L. corniculatus*) se evaluaron variables como emergencia (%) a los 7 y 21 días después de siembra (DDS), altura (cm) a los 35 y 70 DDS, materia seca de parte aérea (MSA) y raíces (MSR) (g/planta⁻¹) a los 70 DDS; fueron analizadas mediante modelos lineales mixtos y análisis de componentes principales. La emergencia se redujo en todas las especies evaluadas entre un 20 % y 30 % en suelos con historial de uso de IMI respecto al control. Las gramíneas y *T. pratense* resultaron más afectadas en altura, MSA y MSR, mientras que *T. repens* y *L. corniculatus* mostraron mayor tolerancia. El análisis multivariado indicó efectos residuales más pronunciados en suelos con mayor contenido de arena. En conjunto, estos resultados muestran que el efecto residual de IMI varía según la especie y el tipo de suelo, lo que resalta la necesidad de considerarlo al planificar las rotaciones arroz-pasturas.

Palabras clave: residualidad, imazapyr, imazapic, persistencia, bioensayos

**Residual effect of imidazolinone herbicides in the emergence and early
development of forage species in rice-livestock systems**

Summary

In Uruguay, rice-livestock systems are characterized by the integration of pastures in rotation with rice (*Oryza sativa*). In this context, herbicides from the imidazolinone (IMI) group constitute the main strategy for controlling weedy rice (*Oryza* spp.) in IMI-tolerant rice varieties. The half-life of the active ingredients imazapic and imazapyr can exceed 100 days in soil, potentially compromising the emergence and early development of pastures established later in the rotation. The objective of this study was to evaluate the residual effects of imazapyr + imazapic applied in IMI-tolerant rice on the emergence and early growth of forage species sown in rice-pasture rotations. During 2021, 2022 and 2023, greenhouse bioassays were conducted using soils collected from Treinta y Tres, Río Branco and Tacuarembó, at two depths (0-15 and 16-30 cm) and with different herbicide-use histories (Control: no history of application; IMI-1: 17 months since the last application; IMI-2: 5 months since last application). Soil organic carbon (%), pH and texture were determined in each sample. Six forage species (*F. arundinacea*, *L. multiflorum*, *L. perenne*, *T. repens*, *T. pratense* and *L. corniculatus*) were evaluated for the following variables: emergence (%) at 7 and 21 days after sowing (DAS), plant height (cm) at 35 and 70 DAS, shoot dry mass (SDM) and root dry mass (RDM) (g plant⁻¹) at 70 DAS. Data were analyzed using linear mixed models and principal component analysis. Emergence was reduced in all species by 20-30% in soils with a history of IMI use compared to the Control. Grasses and *T. pratense* were the most affected in terms of height, SDM and RDM, whereas *T. repens* and *L. corniculatus* showed greater tolerance. The multivariate analysis indicated stronger residual effects in soils with higher sand content. Overall, these results show that the residual effects of IMIs vary depending on species and soil type, underscoring the need to consider these factors when planning rice-pasture rotations.

Keywords: carryover, imazapyr, imazapic, persistence, bioassay

1. **Introducción**

La integración del cultivo de arroz con la ganadería constituye una importante estrategia para mejorar la rentabilidad y la sostenibilidad de los sistemas productivos uruguayos. La siembra de gramíneas y leguminosas forrajeras luego de la cosecha del arroz no solo permite incrementar la producción de carne, sino que también contribuye a la mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo, lo cual favorece el rendimiento de cultivos en ciclos posteriores (Deambrosi, 2003).

De acuerdo con el anuario (DIEA, 2024), aproximadamente el 60 % del área total sembrada con arroz se corresponde con áreas de salida, es decir, superficies destinadas a la siembra de pasturas y verdeos sobre rastrojos. Sin embargo, la implantación y el desarrollo de las especies forrajeras sembradas en estos ambientes presenta diversos desafíos, principalmente asociados a un alto volumen de rastrojo poscosecha, heterogeneidad en las condiciones del terreno y potencial residualidad de herbicidas utilizados en el ciclo del arroz, factores que pueden limitar el establecimiento inicial y disminuir la producción de forraje (Kaspary y Zarza, 2022).

Durante la zafra 2022-2023, 32.000 hectáreas fueron sembradas con variedades de arroz tolerantes a imidazolinonas (DIEA, 2024), de las cuales se estima que 20.000 se destinaron a la siembra de pasturas y verdeos. En estos casos, se debe considerar la posible presencia de residuos en el suelo de los herbicidas imazapyr + imazapic aplicados en el cultivo de arroz. Estos compuestos pueden persistir en el suelo y afectar negativamente la emergencia y desarrollo de las especies forrajeras sembradas en la rotación (Kaspary y Zarza, 2022).

1.1. **Rotación arroz-pasturas**

Los sistemas de rotación arroz-pasturas representan una estrategia fundamental para compatibilizar la producción arroceras con la sostenibilidad ambiental, especialmente en regiones de uso intensivo. La inclusión de pasturas perennes permite recuperar la estructura del suelo, mejorar su fertilidad, interrumpir ciclos de malezas y enfermedades y reducir la presión sobre el uso de agroquímicos e insumos

externos. Desde un enfoque sistémico, esta alternancia no solo mejora los indicadores productivos del arroz y la ganadería, sino que también aporta estabilidad económica y resiliencia frente a condiciones climáticas adversas (Denardin et al., 2020; Franzluebbers, 2007).

A diferencia de esquemas continuos o intensificados como arroz continuo o arroz-soja, las rotaciones que incorporan pasturas promueven una mayor eficiencia en el uso de nutrientes y una menor huella ambiental. Estudios recientes han demostrado que favorecen el reciclaje de nitrógeno, fósforo y potasio, lo cual reduce la dependencia de fertilizantes sin comprometer los rendimientos del cultivo. Además, al integrarse con la ganadería, aportan forraje estratégico de alta calidad en invierno, lo que mejora la eficiencia de producción de carne (De Faccio Carvalho et al., 2021; Macedo et al., 2022).

1.1.1. Especies forrajeras utilizadas en sistemas arroz - pasturas

La elección de especies forrajeras en estas rotaciones se ajusta a la duración y funcionalidad de la fase pastoril. En rotaciones largas (cuatro a seis años), *Festuca* (*Festuca arundinacea*) se ha consolidado como la especie principal por su buena productividad, persistencia y capacidad de mejorar la calidad del tapiz. En rotaciones más cortas, con menos de tres años de pastura, se priorizan especies de rápido establecimiento y ciclo corto como el raigrás anual (*Lolium multiflorum*) o bianual. Estas decisiones reflejan un ajuste técnico-productivo orientado a maximizar los beneficios de la fase forrajera, adaptándola al contexto operativo del sistema (Rovira et al., 2019).

La siembra en cobertura sobre rastrojo de arroz tras la cosecha, utilizando mezcla de especies como las gramíneas antes mencionadas con trébol blanco (*Trifolium repens*) y Lotus (*Lotus corniculatus*), fue recomendada desde etapas tempranas del desarrollo de sistemas arroz-ganadería como una estrategia efectiva para establecer pasturas tras el cultivo (Bonilla y Grierson, 1982). Esta práctica permitió integrar la fase forrajera sin interrumpir significativamente el ciclo agrícola, lo cual favorece una transición eficiente entre el cultivo de arroz y la implantación de la pastura. Entre estas especies leguminosas, el trébol blanco ha sido señalado como

el principal responsable del rendimiento forrajero en situaciones normales, mientras que el *Lotus* contribuye a extender la producción hacia el verano, especialmente en años lluviosos, y puede incluso ayudar a reducir problemas de meteorismo en el ganado (Mas, 1976). El trébol rojo (*Trifolium pratense*) también constituye una leguminosa adaptada a siembras sobre rastros de arroz y es recomendado para pasturas de corta duración, con alta frecuencia de cultivo en la rotación (Mas, 1996).

Aunque la elección de especies forrajeras responde a criterios productivos y de manejo, el uso de arroz tolerante a imidazolinonas ha generado una nueva inquietud, el posible efecto residual de estos herbicidas sobre especies sensibles. Este aspecto ha motivado varios estudios que se abordan en una sección posterior.

1.2. Arroz tolerante a imidazolinonas

El arroz tolerante a herbicidas inhibidores de la enzima acetolactato sintasa (ALS), en particular aquellos pertenecientes a la familia química de las imidazolinonas, constituye una de las principales estrategias para el control de malezas problemáticas en sistemas arroceros. Esta tecnología surge como respuesta a la creciente infestación de arroz maleza (*Oryza sativa*) en el área de cultivo.

En rotaciones agrícolas intensivas, el arroz maleza representa una de las principales amenazas para la producción comercial, dada por su alta capacidad competitiva y abundante producción de semillas. El control químico selectivo de esta especie resulta especialmente complejo debido a su similitud morfológica, fisiológica y genética con el arroz cultivado (pertenecen a la misma especie), lo que impide el uso de herbicidas convencionales sin afectar el cultivo comercial. Además, su presencia genera importantes pérdidas industriales, afecta la calidad del grano cosechado y ocasiona pérdidas económicas considerables, con reducciones que rondan en un 80 % de productividad. Ante esta limitante, el desarrollo de cultivares resistentes a herbicidas selectivos se consolidó como una herramienta clave para su manejo (Delouche et al., 2007; Smith, 1988; Topolansky, 1975).

La tecnología de arroz resistente a imidazolinonas surgió a fines de la década del 90, como resultado de un programa de mejoramiento genético, sin recurrir a técnicas de transgénesis. Se empleó mutagénesis inducida mediante agentes

específicos, con el fin de desarrollar variedades resistentes a herbicidas inhibidores de la enzima ALS. Las mutaciones consistieron en la sustitución de una guanina por una adenosina, en tres posiciones diferentes de la secuencia nucleótida del gen que codifica dicha enzima. Estas se generaron a partir de someter la semilla de arroz a metanosulfonato de etilo. Las variedades resultantes poseen mutaciones puntuales en el sitio de acción del herbicida, lo que impide la unión del compuesto con la enzima y permite que las plantas sobrevivan a la aplicación sin sufrir efectos fitotóxicos (Croughan et al., 1996; Rosas et al., 2014).

El primer cultivo en incorporar la tolerancia fue maíz (*Zea mays*) y posteriormente se extendió a otros como girasol (*Helianthus annuus*), trigo (*Triticum aestivum*), colza (*Brassica napus*) y arroz (*Oryza sativa*). En este último, el evento de tolerancia fue desarrollado por la Estación Experimental de Crowley, perteneciente a la Universidad Estatal de Luisiana (EE. UU.), a través de selección dirigida en laboratorio y ensayos de campo. El sistema permitió por primera vez el control químico selectivo de arroz maleza, junto a otras malezas asociadas, como capín (*Echinochloa crus-galli*) y ciperáceas (*Cyperus* sp.). Esto mediante herbicidas de la familia imidazolinonas aplicados en preemergencia o posemergencia del cultivo (Tan et al., 2005).

La introducción comercial del arroz tolerante a imidazolinonas en Estados Unidos se produjo en el año 2001, posteriormente se desarrollaron y comercializaron materiales en Brasil y Argentina (Livore, 2010; Tan et al., 2005). En Uruguay, esta tecnología fue incorporada a partir de la zafra 2005-2006. Según datos de DIEA (2024), en la zafra 2008-2009, se estimó que un 31 % del área sembrada total de arroz había realizado un manejo diferencial por la presencia de arroz maleza. En la zafra 2023-2024, se registraron 31.000 hectáreas sembradas con variedades resistentes, representando aproximadamente un 22 % del área total destinada a arroz en este ciclo.

La adopción de esta tecnología se basa en la posibilidad de controlar malezas gramíneas difíciles, en particular el arroz maleza, mediante la aplicación selectiva de herbicidas preemergentes y posemergentes sin dañar el cultivo. Esto ofrece una herramienta eficiente y rentable para productores que enfrentan altos niveles de

infestación y facilita la implementación de esquemas de manejo más sostenibles cuando se integra con prácticas como la rotación de cultivos. Los herbicidas utilizados en estos sistemas actualmente son imazapyr + imazapic, ambos pertenecientes a la familia de las imidazolinonas, caracterizados por su inhibición de la enzima ALS, acción sistémica y potencial de persistencia en el suelo.

1.3. Familia de las imidazolinonas

Los herbicidas de la familia química de las imidazolinonas son compuestos ampliamente utilizados en sistemas agrícolas para el control de malezas, tanto gramíneas como hoja ancha. Pertenecen al grupo con mayor número de principios activos, los inhibidores de la enzima ALS (HRAC, s. f.). Entre los más representativos se encuentran el imazapir, imazapic, imazethapir, imazamox e imazaquin; son utilizados en diversos cultivos, incluidos maíz, soja, trigo, girasol y arroz. Estos herbicidas presentan características comunes como baja dosis efectiva, actividad sistémica y la posibilidad de aplicación en preemergencia o posemergencia según el cultivo y el producto formulado.

1.3.1. Mecanismo de acción

Las imidazolinonas inhiben la enzima ALS, también conocida como *acetohidroxiácido sintasa* (AHAS). Esta enzima cataliza el paso inicial en la síntesis de aminoácidos de cadena ramificada (valina, leucina e isoleucina), esenciales para la formación de proteínas y el crecimiento celular. Su inhibición genera interrupción del metabolismo, especialmente en tejidos meristemáticos, lo cual provoca la detención del crecimiento, seguida de clorosis y necrosis progresiva (Shaner y O'Connor, 1991; Shaner, 2014).

Estos herbicidas son compuestos sistémicos, capaces de ser absorbidos por vía radicular y foliar. Se translocan a través del floema y xilema para posteriormente ser acumulados en los meristemas apicales y yemas axilares (Anderson, 1996; Monaco et al., 2002). Cuando se encuentran disueltos en la solución del suelo, las imidazolinonas penetran por las raíces, atravesando la epidermis que conduce a la corteza radicular. En aplicaciones posemergentes, su absorción ocurre

preferentemente por vía foliar, atravesando la cutícula cerosa de la hoja antes de su translocación hasta zonas de división activa (Little y Shaner, 1991).

La acción del herbicida comienza pocas horas después de la aplicación, con una inhibición inmediata del crecimiento. Posteriormente, entre dos y cuatro días después, los tejidos meristemáticos presentan síntomas visibles, como clorosis progresiva, seguida de necrosis, con daño más pronunciado en zonas de crecimiento activo. En siete-diez días, la planta se vuelve clorótica y finalmente muere. Estos compuestos también actúan inhibiendo el crecimiento de las raíces, lo cual causa una reducción del sistema radicular. En especies herbáceas, los síntomas incluyen puntos de crecimiento deformados y reducción del tamaño de hojas y tallos, mientras que en plantas leñosas pueden incluir detención del crecimiento, clorosis generalizada y defoliación (Monaco et al., 2002).

1.3.2. Degradación y persistencia en el suelo

Los herbicidas de la familia imidazolinonas tienen una lenta tasa de degradación y su actividad en suelo, a bajas concentraciones, los convierte en una herramienta eficaz para el control de malezas. Si bien estos herbicidas se degradan por volatilización, hidrólisis química y fotodegradación, la principal vía de disipación es microbiana, mediante microorganismos aerobios (Flint y Witt, 1997; Ramezani et al., 2008).

La vida media de estos compuestos en el suelo puede variar y depende de las condiciones edafoclimáticas, con valores reportados entre 10 y 300 días. En particular, para imazapyr, la bibliografía reporta una vida media de 25 a 142 días; para imazetapir, de 60 a 90 días, y para imazapic, de hasta 120 días (Gehrke et al., 2021; Senseman y Armbrust, 2007; Shaner, 2014).

La persistencia en el suelo está fuertemente condicionada por múltiples factores, tanto del herbicida como del ambiente y manejo. Entre los principales determinantes se destacan el contenido de materia orgánica, pH, textura del suelo, temperatura, humedad y frecuencia de riego o inundación (Aichele y Penner, 2005; Gehrke et al., 2021). Además, procesos como la sorción, lixiviación y flujo de agua

por capilaridad también regulan el comportamiento de estas moléculas en el perfil del suelo (Bundt, Avila, Pivetta et al., 2015; Oliveira Júnior y Regitano, 2009).

Se ha demostrado que, en condiciones anaeróbicas o en suelos con pobre aireación, la actividad microbiana se reduce por la falta de oxígeno. Esto disminuye la tasa de degradación de los herbicidas y prolonga la vida útil en el suelo. Prácticas como el drenaje o inundación intermitente han demostrado favorecer la degradación de las imidazolinonas al mejorar la aireación del suelo y estimular la actividad microbiana (Helgueira et al., 2019; Junkes et al., 2022; Martini et al., 2011; Schreiber et al., 2017).

En este sentido, la humedad durante el invierno también tiene un papel clave en el comportamiento de estos herbicidas. Inviernos tanto muy secos como muy húmedos pueden extender el efecto residual, lo cual afecta el establecimiento de cultivos de cobertura como *Lolium multiflorum* (Avila et al., 2010). Altos contenidos de humedad disminuyen la adsorción por el suelo y precipitaciones insuficientes disminuyen la degradación microbiana (Shaner y Hornford, 2005).

La temperatura del suelo también es mencionada por diferentes autores como un factor que influye en la degradación. Diversos estudios han demostrado que bajas temperaturas enlentecen la disipación de estos compuestos, lo que aumenta su persistencia. Por ejemplo, McDowell et al. (1997) reportaron una disminución significativa en la vida media de imazapir al aumentar la temperatura del suelo de 15 °C a 30 °C. De forma similar, Basham y Lavy (1987) observaron una mayor persistencia de imazaquin en condiciones frías y secas. Se ha descrito que la temperatura también afecta los procesos de adsorción del herbicida, los cuales tienden a incrementarse con el aumento de la temperatura y la disminución del pH (Wang y Liu, 1999).

Las imidazolinonas son compuestos anfóteros, lo que significa que pueden comportarse como ácidos o bases dependiendo del pH del entorno. Poseen grupos funcionales carboxilos (-COOH) y amino (-NH), lo que permite que existan formas catiónicas, neutras o aniónica según el pH del medio. A pH bajos predomina la forma catiónica, mientras que a pH neutro o alcalino se favorecen las formas neutras o aniónicas, respectivamente (Bresnahan et al., 2002). Esta propiedad influye

directamente en su solubilidad, sorción y movilidad en el suelo, aspectos que determinan su actividad herbicida y persistencia. Por ejemplo, el aumento de pH mediante encalado puede incrementar la lixiviación de imazapir e imazetapir, especialmente en suelos inundados (Refatti et al., 2014).

La movilidad y disponibilidad de las imidazolinonas varía con el tipo de compuesto y propiedades físico-químicas del suelo. Por ejemplo, el imazetapir ha mostrado alta concentración en los primeros 5 cm del perfil en siembra convencional, aunque puede lixivarse hasta 20 cm en condiciones favorables (Kraemer et al., 2009). Niveles bajos de materia orgánica favorecen la desorción y movilidad del herbicida, lo que incrementa su potencial de acumulación en horizontes más profundos del suelo (Wang y Liu, 1999). Mangels et al. (1991) han señalado que el contenido de arcilla influye en la retención y movilidad. En ese sentido, Su et al. (2019) encontraron que, en un suelo con altos contenidos de arcilla y limo (70 %), la adsorción de imazapir fue significativa. Además, destacan que la capacidad de retención está dada por la superficie de adsorción que tienen tanto la fracción limo como la arcilla.

Respecto a las aplicaciones periódicas de herbicidas, estudios han demostrado que no se promueve la degradación microbiana acelerada, como ocurre con otras familias químicas. De hecho, algunas imidazolinonas, como el imazapir, pueden incluso reducir la actividad microbiana del suelo, lo que contribuye a su acumulación y efecto residual prolongado (Bundt, Avila, Pivetta et al., 2015). Esto es especialmente relevante en situaciones donde los herbicidas se aplican año tras año, como ocurre en sistemas de rotaciones de cultivos intensivos.

La persistencia prolongada de las imidazolinonas puede generar efectos adversos sobre cultivos en la rotación, especialmente cuando se siembran especies susceptibles como gramíneas o leguminosas forrajeras. En suelos con alta proporción de arena, mal drenaje, pH bajo y escaso contenido de materia orgánica, se incrementa el riesgo de fitotoxicidad (Saldain, Bermúdez, et al., 2014).

Especies como *Lolium multiflorum*, *Trifolium repens* o *Lotus corniculatus* pueden ejercer cierto efecto de fitorremediación, lo cual ayuda a reducir la concentración de residuos en el suelo, a través del estímulo de comunidades

microbianas degradadoras (Souto et al., 2013; Souto et al., 2020; Ulgium et al., 2019). Por tanto, el conocimiento de la dinámica de estos herbicidas es fundamental, no solo para diseñar estrategias de manejo que minimicen los riesgos de daño a cultivos y forrajes en la rotación, sino también los posibles impactos en el ambiente.

1.3.3. Efecto residual en especies susceptibles

El uso de herbicidas imidazolinonas en cultivos tolerantes, como el arroz, ha generado preocupación por los efectos residuales sobre especies susceptibles sembradas en sucesión. Diversos estudios han evidenciado que residuos de mezclas como imazetapir + imazapic o imazapyr + imazapic pueden persistir en el suelo durante largos períodos, lo cual afecta negativamente el desarrollo de especies no tolerantes. La magnitud del efecto depende de factores como dosis aplicada, tipo de suelo, condiciones ambientales, intervalo entre cultivos y sensibilidad específica de la especie sembrada.

En especies como *Lolium multiflorum*, Bundt, Avila, Agostinetti et al. (2015) han reportado reducciones de materia seca hasta los 128 días después de la aplicación de la mezcla de imazetapir + imazapic. Otros autores también evidenciaron la reducción en producción de forraje de *Lolium multiflorum* y *Trifolium pratense* cuando se sembraron 180 días después de la cosecha de arroz tolerante a imidazolinonas, especialmente en suelos con menor contenido de materia orgánica (Saldain et al., 2012).

En el caso de arroz no tolerante a imidazolinonas, los residuos pueden afectar el rendimiento en el grano hasta 280 días después de la aplicación y se han documentado reducciones de rendimiento de hasta un 55 % incluso transcurridos 371 días, con daños visibles hasta los 705 días, sin pérdida de rendimiento (Marchesan et al., 2010).

En *Sorghum bicolor*, Pinto, Noldin, Pinho et al. (2009) registraron efectos residuales de imazapyr e imazetapir que causaron daños irreversibles, afectaron la densidad de plantas, altura, peso de mil granos y rendimiento. Resultados similares fueron observados por Souza et al. (2016), quienes documentaron reducciones de hasta 94 % en la materia seca de sorgo 150 días después de la aplicación. Estos

efectos fueron atribuibles a la persistencia del herbicida en el perfil del suelo, influida por variables como en pH, textura y contenido de óxidos de hierro.

En bioensayos conducidos en suelos franco-arenosos y franco-limosos, se evidenció inhibición del crecimiento de *Sorghum bicolor* a dos profundidades, 0-10 y 10-20 cm, lo que indica la migración del herbicida a horizontes más profundos (Saldain, López, et al., 2014). El uso continuo de herbicidas imidazolinonas, sin prácticas de mitigación, puede incrementar la acumulación de residuos en el perfil del suelo, lo que afecta a las especies sembradas en rotación (Bundt, Avila, Agostinetto et al., 2015).

Diversos trabajos han demostrado que los residuos afectan no solo gramíneas, sino también leguminosas y especies de interés agrícola como soja, maíz, pepino, alfalfa, cebolla, remolacha y tomate, entre otros (Alister y Kogan, 2005; Ulbrich et al., 2005). En un estudio realizado por Oliveira et al. (2019), se observó que aplicaciones de imazapyr + imazapic redujeron la materia seca de brotes y raíces de soja sembrada 359 días después del tratamiento, mientras que el raigrás sembrado a los 129 días también mostró una destacada reducción de materia seca. Además, en sistemas de rotación arroz-soja, los efectos negativos sobre la producción de soja se agravan con dosis mayores a las recomendadas en etiqueta de imidazolinonas (Ulgium et al., 2019).

Los efectos también dependen de la formulación utilizada. Santos et al. (2014) reportaron que la mezcla de imazapir + imazapic presentó mayor residualidad que imazetapir + imazapic, lo que afectó altura y materia seca de raigrás y arroz no tolerante. En otro estudio, Oliveira et al. (2019) destacaron el potencial del raigrás como especie de fitorremediación, capaz de reducir el impacto de los residuos de imidazolinonas y mejorar el rendimiento del cultivo siguiente, como la soja. Esto coincide con hallazgos de Souto et al. (2020), que vinculan el uso de cultivos cobertura con la estimulación de poblaciones microbianas capaces de metabolizar herbicidas.

Además, estudios recientes han cuantificado los efectos a partir de concentraciones residuales en suelo. Anzalone et al. (2011) encontraron reducciones de hasta 50 % en materia seca de maíz con residuos de imazetapir + imazapic en

concentraciones tan bajas como 0,0875 a 0,0965 mg/kg de suelo. Chiapinotto et al. (2024) señalaron que concentraciones de imazapir + imazapic entre 4,07 y 5,02 µg/kg de suelo pueden reducir a altura de plantas de arroz no tolerante en un 10 % y concentraciones entre 2,76 y 4,55 µg/kg pueden causar reducciones similares en rendimiento. Esto evidencia el riesgo de *carryover* incluso con residuos equivalentes a un 3-6 % de la dosis de campo.

Es fundamental implementar prácticas de manejo agronómico que reduzcan el riesgo de efectos residuales. Gehrke et al. (2021) y Junkes et al. (2022) recomiendan estrategias como la rotación de cultivos más tolerantes, siembra de cultivos cobertura, correcciones de pH y drenaje invernal. Estas medidas contribuyen a reducir la persistencia de los herbicidas en el suelo y minimizar su impacto sobre los cultivos en rotación.

1.4. **Bioensayos**

Los residuos de herbicidas pueden persistir en el suelo tras su aplicación y generar efectos fitotóxicos sobre cultivos sensibles en la rotación. Evaluar la presencia de estos compuestos antes de la implantación de un nuevo cultivo es relevante cuando no se cuenta con intervalos de siembra seguros o cuando las experiencias agronómicas previas indican posibles daños a especies sembradas. Entre los métodos disponibles, los bioensayos se han destacado por su bajo costo, simplicidad y efectividad en la evaluación de la presencia de residuos activos en el suelo. Esta técnica consiste en sembrar especies indicadoras o sensibles sobre muestras de suelo con historial conocido de uso del herbicida, comparando su respuesta con la observada en suelos no tratados. Su aplicación ha sido ampliamente documentada en la literatura como una herramienta útil para inferir en la actividad residual de herbicidas en distintas condiciones edáficas (Klein et al., 2008; Neal, 2021).

Diversos estudios han validado el uso de bioensayos como método para inferir la presencia y actividad residual de herbicidas en el suelo. Anzalone et al. (2011) utilizaron *Phaseolus vulgaris* como especie bioindicadora para detectar residuos de herbicidas del grupo de las imidazolinonas, con lo que demostraron su sensibilidad y

utilidad en bioensayos. De forma similar, Scursoni et al. (2017) evaluaron el efecto residual de imidazolinonas en *Hordeum vulgare* L., *Avena sativa* y *Triticum aestivum*, midiendo variables como altura y producción de materia seca en condiciones de invernáculo. Los autores observaron reducciones significativas en el crecimiento y acumulación de materia seca, lo que evidenció la persistencia de estos compuestos en el suelo. Ulbrich et al. (2005), por su parte, confirmaron la utilidad de los bioensayos utilizando *Cucumis sativus* L. como especie indicadora y registraron síntomas de fitotoxicidad en suelos con aplicación de imazapir e imazapic. Asimismo, Gianelli et al. (2011) emplearon un bioensayo en cámara de crecimiento para evaluar la sensibilidad de distintas especies a residuos de imazapir y concluyeron que la persistencia fitotóxica del herbicida según el grado de afección observado era de trigo > colza > girasol = maíz.

Si bien los bioensayos ofrecen múltiples ventajas, presentan limitaciones que deben considerarse al momento de su aplicación e interpretación. Una de las principales restricciones radica en que el muestreo de suelo puede no capturar la variabilidad espacial presente en el terreno. Asimismo, las condiciones controladas de un bioensayo en maceta pueden no reproducir la dinámica de un cultivo en el campo, donde las raíces pueden explorar estratos más profundos y crecer fuera de la capa del suelo con concentración de herbicidas. No obstante, una de las fortalezas de esta metodología es su sensibilidad para detectar efectos biológicos de herbicidas en concentraciones que, en ocasiones, escapan a la detección de análisis químicos convencionales. En este sentido, los bioensayos integran la influencia de propiedades del suelo como en pH, el contenido de materia orgánica, la textura y la humedad, factores que afectan directamente la disponibilidad del herbicida en el suelo (Anzalone et al., 2011; Watson y Checkel, 2005).

1.5. **Objetivos e hipótesis**

El objetivo general de este trabajo fue evaluar, mediante bioensayos, la emergencia y desarrollo inicial de diferentes especies forrajeras sembradas en sucesión al cultivo de arroz tolerante a imidazolinonas.

Como objetivo específico se busca determinar el potencial efecto residual de los herbicidas imazapyr + imazapic sobre distintas especies forrajeras: *Festuca arundinacea*, *Lolium multiflorum*, *L. perenne*, *Trifolium repens*, *T. pratense* y *Lotus corniculatus*, en términos de emergencia, altura y acumulación de materia seca, utilizando muestras de suelo con historial conocido de uso de herbicidas IMI.

La hipótesis se centra en que los herbicidas imazapyr + imazapic aplicados en el cultivo de arroz presentan una persistencia en el suelo suficiente para generar efectos fitotóxicos en las especies forrajeras sembradas en la rotación, los cuales afectan su emergencia y desarrollo inicial, con una magnitud que varía en función de la especie utilizada, las características de cada suelo y el histórico de uso de herbicidas IMI.

2. Residual Effect of Imidazolinone Herbicides on Emergence and Early Development of Forages Species in Rice-Livestock Systems¹

Valentina Rodríguez-De-Barbieri¹, Pablo González-Barrios², Pablo Rovira³, Claudia Marchesi³, Robin Cuadro³ Rodrigo Zarza³ and Tiago Edu Kasparý³

1. Faculty of Agronomy, Universidad de la República (UDELAR), Montevideo 12900, Uruguay; valerdbuy@gmail.com

2. Department of Biometrics and Statistics, Faculty of Agronomy, Universidad de la República (UDELAR), Montevideo 12900, Uruguay; pgonza2211@gmail.com

3. National Institute of Agricultural Research of Uruguay (INIA), Research Station, Treinta y Tres 33000, Uruguay; provira@inia.org.uy (P.R.); cmarchesi@inia.org.uy (C.M.); rcuadro@inia.org.uy (R.C.); rzarza@inia.org.uy (R.Z.)

* Correspondence: tkasparý@inia.org.uy

2.1. Resumen

La intensificación de los sistemas arroz-ganadería ha promovido la integración del cultivo de arroz con especies forrajeras. Sin embargo, el uso de cultivares de arroz tolerante a herbicidas imidazolinonas (imazapyr + imazapic) puede comprometer la implantación de especies sensibles debido a su persistencia en el suelo. El objetivo de este trabajo fue evaluar, mediante bioensayos, la emergencia y desarrollo inicial de seis especies forrajeras sembradas en suelos con distinto historial de uso de imidazolinonas. Los ensayos se realizaron durante tres años (2021, 2022, 2023) con suelos recolectados en tres regiones de Uruguay, en dos profundidades y bajo tres condiciones (control, IMI-1, IMI-2). Se evaluaron emergencia, altura y biomasa aérea y radicular. Se aplicaron modelos lineales mixtos y análisis de componentes principales. Se observaron reducciones de hasta un 60 % en biomasa aérea en suelos IMI-2. Las gramíneas y *Trifolium pratense* fueron las especies más afectadas, mientras que *Trifolium repens* y *Lotus corniculatus* mostraron mayor tolerancia. El análisis multivariado indicó que suelos con más contenido de arena presentaron mayores efectos residuales. La residualidad de imidazolinonas depende

de la especie forrajera y de las propiedades del suelo, lo cual debe considerarse al planificar de rotaciones arroz-pasturas.

Palabras clave: residualidad; imazapyr; imazapic; persistencia en suelo; bioensayo; rotación arroz-pasturas

¹ Artículo publicado en la revista *International Journal of Plant Biology*.

2.2. Summary

The intensification of rice–livestock systems has encouraged the integration of forage species into rice cultivation. However, the use of imidazolinone-tolerant rice cultivars (imazapyr + imazapic, IMIs), essential for weedy rice control, may hinder the establishment of sensitive forages due to herbicide residues. This study evaluated the emergence and early growth of six forage species through bioassays in soils with different IMI use histories. Over three years (2021–2023), soils were collected from three rice-growing regions in Uruguay with contrasting soil properties, at depths of 0–15 and 16–30 cm, under three IMI conditions: Control (no prior use), IMI-1 (applied one season before sampling), and IMI-2 (applied in the season before sampling). Emergence, plant height, and shoot and root biomass were analyzed using linear mixed models and principal component analysis. Shoot biomass was reduced by up to 60% in IMI-2 soils. Poaceae species and *T. pratense* were the most affected, while *T. repens* and *L. corniculatus* exhibited higher tolerance. Multivariate analysis indicated stronger residual effects on sandy loam soils. These findings highlight that imidazolinone persistence varies with forage species and soil properties, underscoring the need for careful planning in rice–pasture rotations to prevent adverse effects on forage establishment and system sustainability.

Keywords: *carryover*; imazapyr; imazapic; persistence in soil; bioassay; rice-pasture rotation

2.3. Introduction

The integration of rice (*Oryza sativa*) cultivation with forage systems represents a strategy aimed at optimizing resource use, enhancing sustainability, and increasing the overall productivity of the system. Following rice harvest, the sowing of grass and legume species in livestock-based systems extends the grazing period and promotes the recovery of the soil's physical and chemical properties, with positive effects on crop yield in subsequent cycles [1–3]. In Uruguay, the main forage species sown in these systems include ryegrass (*Lolium multiflorum*), tall fescue (*Festuca arundinacea*), white clover (*Trifolium repens*), and bird's-foot trefoil (*Lotus corniculatus*). However, pasture establishment can be limited by several factors, including the high volume of rice stubble and the presence of herbicide residues from the previous growing season [4].

Approximately 60% of the area devoted to rice cultivation in Uruguay is integrated into rotation systems with pastures. Within this area, around 25% is in soils previously planted with rice tolerant to acetolactate synthase (ALS)-inhibiting herbicides, particularly those belonging to the imidazolinone group (imazapyr + imazapic—IMIs) [5]. In this context, the development and use of IMI-tolerant rice cultivars have enabled effective control of problematic weeds, including weedy rice (*Oryza spp.*) [6]. These herbicides are characterized by high persistence in soil and prolonged residual activity [7–9], which are determined by edaphoclimatic factors, such as soil texture, pH, organic matter, moisture and temperature [10–13].

Several studies have demonstrated that imidazolinones can remain active in the soil for over 300 days, causing residual effects—known as carryover—on sensitive crops sown in rotation [14,15]. Reductions of up to 94% in dry matter of sorghum (*Sorghum bicolor*) have been reported 150 days after application [16]. In non-tolerant rice, yield losses close to 55% were observed even 371 days after the last herbicide application. Moreover, a 10% decrease in plant height was recorded when imazapyr + imazapic concentrations reached 4.07 and 5.02 $\mu\text{g kg}^{-1}$ of soil, respectively [17,18]. In soybean (*Glycine max*), reductions in both shoot and root biomass were reported up to 359 days post-application [19]. In forage species such as annual ryegrass (*Lolium multiflorum*) and red clover (*Trifolium pratense*), significant

decreases in forage production were detected up to 180 days after exposure to these herbicides [20–23].

In this context, bioassays are considered an efficient tool to evaluate the persistence and activity of herbicide residues in the soil [24,25]. They allow for the detection of effects on sensitive species by using soil samples either with direct herbicide applications or with a history of herbicide use.

The aim of this study was to evaluate the carryover effect of IMIs on the establishment and early development of six forage species through bioassays using soils with a history of imazapyr + imazapic application during rice cultivation. The hypothesis was that residues of these herbicides persist in the soil long enough to cause phytotoxic effects, within a magnitude that varies depending on species, soil depth, edaphic properties, and herbicide use history. To our knowledge, this is the first multi-year evaluation of IMIs residues on forage species in rice-pasture rotations in Uruguay. This work provides novel experimental evidence of the carryover effect under controlled conditions and offers practical insights to improve the planning of the forage phase and management decisions in rice-pasture systems.

2.4. Materials and Methods

2.4.1. Soil Origin and Sampling

Bioassays were conducted in 2021, 2022 and 2023 using soils collected from agricultural fields located in productive regions of Uruguay, representative of different soil textural classes. For each region and sampling year, approximately 45 days after rice harvest, soils were collected from three contrasting herbicide use conditions: Control, with no history of IMIs application; IMI-1, where imazapyr + imazapic were applied during the cropping season prior to sampling (more than 17 months since the last application); and IMI-2, where imazapyr + imazapic were applied during the season immediately preceding sampling (less than 5 months since the last application) (Table 1).

Table 1. Description of imidazolinone herbicide use for each sampling site in the years 2021, 2022 and 2023.

Sampling Area	Year(s)	Herbicide Use History	Product (Formulation)	Dose (g a.i. ha ⁻¹)	Number of Applications	Time Since Last Application		
Rio Branco	2021, 2022, 2023	Control	-	-	-	-		
		IMI-1	imazapyr +	52.5 + 17.5	2	≈17 months		
		IMI-2	imazapic			≈5 months		
Treinta y Tres	2021, 2022, 2023	Control	-	-	-	-		
		IMI-1	imazapyr +	52.5 + 17.5	2	≈17 months		
		IMI-2	imazapic			≈5 months		
UEPL ¹	2022	Control	-	-	-	-		
		IMI-2	imazapyr +	52.5 + 17.5	1	≈5 months		
Tacuarembó	2023	Control	-	-	-	-		
		IMI-1	imazapyr +	52.5 + 17.5	2	≈17 months		
		IMI-2	imazapic			≈5 months		
¹ UEPL	=	Paso	de	la	Laguna	Experimental	Research	Station.

Composite samples were collected for each condition, consisting of three randomly selected subsamples representative of 30 cm in width $\times$ 30 cm in length $\times$ 30 cm in depth. Each sample was then divided into two layers: 0–15 cm and 16–30 cm depth. After collection, soils were air-dried at room temperature and partially sieved to facilitate their use for forage species sowing. In addition, a subsample was taken for physicochemical soil analysis. The composite soil sample obtained for each condition was used to fill pots. For each forage species within a given combination, four pots were established from the same composite, thus representing independent biological responses rather than independent soil replicates.

2.4.2. Soil Characterization

The physicochemical characteristics of the soils used in the bioassays for each sampling region are summarized in Table 2. Detailed data by site, year, and land use are available in the Supplementary Material (Tables S1–S3).

Table 2. Mean physicochemical properties of soils used in the bioassays, by site, land use and depth.

Sampling Area	Herbicide Use History	pH (H ₂ O)		Organic Carbon (%)		Texture
		0–15 cm ²	16–30 cm	0–15 cm	16–30 cm	
Rio Branco	Control	5.4	6.4	1.15	0.64	Loam
	IMI-1	5.2	6.2	0.85	0.55	
	IMI-2	5.4	6.2	0.79	0.59	
Treinta y Tres	Control	5.3	5.9	1.80	0.92	Silty clay loam
	IMI-1	6.4	7.6	1.67	0.77	
	IMI-2	5.3	6.5	1.44	0.79	
UEPL ¹	Control	5.4	6.5	1.35	0.75	Silty clay loam
	IMI-1	6.2	7.7	0.81	0.52	
Tacuarembó	Control	4.8	5.4	1.09	0.49	Sandy loam
	IMI-1	5.4	6.6	1.30	0.64	
	IMI-2	5.2	6.5	0.89	0.81	

¹UEPL = Paso de la Laguna Experimental Research Station; ²Depth = 0–15 and 16–30 cm.

2.4.3. Experimental Design of the Bioassays

The bioassays were conducted using 0.3 L pots filled with soil corresponding to each combination of site, herbicide use history, and depth. Within each combination, the six forage species were randomized, with four pots per species established. The species evaluated are commonly used in rice-pasture systems: tall fescue (*Festuca arundinacea* cv. INIA Fortuna), annual ryegrass (*Lolium multiflorum* cv. LE 284), perennial ryegrass (*Lolium perenne* cv. Virazón), white clover (*Trifolium repens* cv. Estanzuela Zapicán), red clover (*Trifolium pratense* cv. INIA Antares) and bird's-foot trefoil (*Lotus corniculatus* cv. INIA Rigel). Twelve seeds were sown per pot, and the experiments were maintained under greenhouse conditions (15 ± 5 °C, 12/12 h light/dark cycle, and daily irrigation). A total of 21 days after sowing (DAS), seedlings were thinned to leave two plants per pot. Thus, the four replicates per species represent variability in plant performance under uniform soil conditions, rather than independent soil replicates.

The variables evaluated were:

- Emergence (%): determined at 21 DAS by counting the number of seedlings emerging per pot. Seedlings were considered to have emerged if they were visible above the soil surface with clearly unfolded cotyledons or first leaves. The value was expressed as a percentage relative to the total number of seeds sown. Although seed physiological quality was not assessed, the seed lots used showed germination and vigor levels above the minimum standards established by the National Seed Institute—Uruguay (INASE) [26].

- Plant height (cm): measured at 35 and 70 DAS. For grasses, height was determined from the soil surface to the tip of the last fully expanded true leaf. For legumes, it was measured from the base of the plant to the last visible node in the main stem.

- Shoot and root dry mass: at the end of the bioassay (70 DAS), plants were harvested. Shoots and roots systems were carefully separated, with excess soil gently removed. Both fractions were washed, dried, and then oven-dried at 60 °C until constant weight was reached. Results were expressed as grams of dry matter per plant ($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$).

2.4.4. Statistical Analysis

Statistical analyses were performed using linear mixed models within a factorial structure that included the fixed effects of IMI herbicide use history, forage species, and sampling depth, as well as their interactions. These three factors were treated as fixed effects, while replication and site nested within year were included as random effects to account for spatial and temporal variability in the experiment. All response variables were analyzed through ANOVA, and when significant effects were detected, multiple comparisons were performed using Tukey's test at 95% confidence level. Residual diagnostics were also conducted for all variables to verify model assumptions, including normality and homoscedasticity.

Multivariate analyses were performed to complement the results and explore multivariate patterns of association between soil variables—such as texture (sand, silt, and clay), pH, and organic carbon content—and plant response variables. For this purpose, a principal component analysis (PCA) was conducted and graphically

evaluated using biplots. All analyses were carried out using R statistical software (version 4.5.0) [27].

2.5. Results and Discussion

2.5.1. Plant Response Variables

2.5.1.1. Emergence

Plant emergence (%) at 21 DAS showed a significant three-way interaction ($p < 0.05$) among the factors forage species, soil depth, and herbicide use history (Table S4). The different species evaluated in the bioassays exhibited lower emergence values when sown in IMI-1 and IMI-2 soils compared to the Control, with no history of IMI herbicide application (Figure 1).

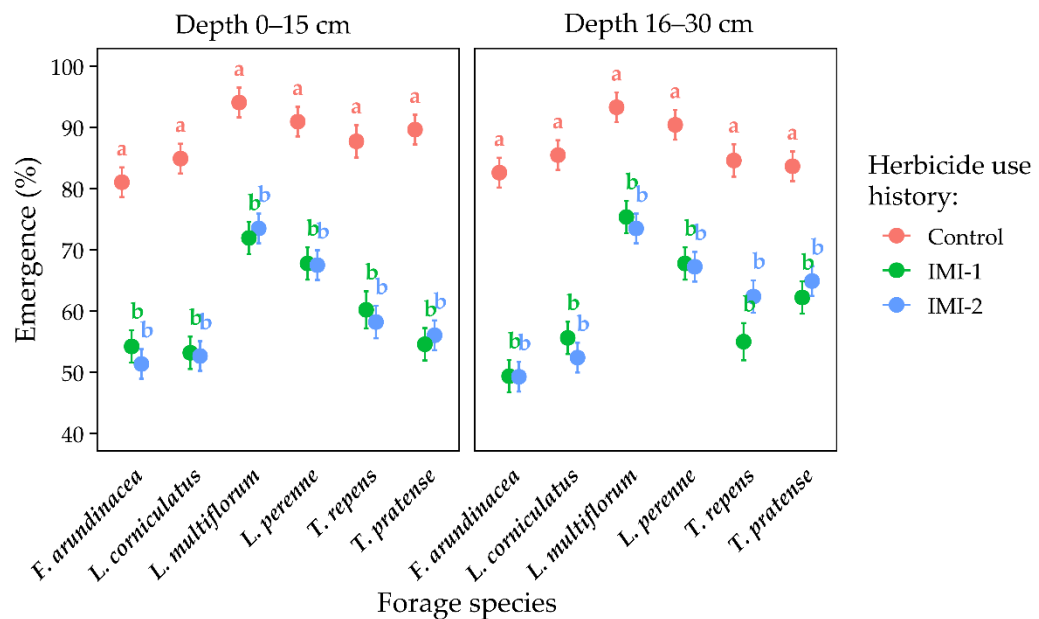


Figure 1. Emergence (%) of different forage species as affected by herbicide use history and soil depth, evaluated 21 days after sowing (DAS), INIA 2025. Different letters indicate significant differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

Among the grasses, *F. arundinacea* was the most affected species, with an average emergence reduction of 30% in soils with a history of IMI use, regardless of sampling depth (Figure 1). In contrast, *L. multiflorum* and *L. perenne* showed lower sensitivity, with emergence reductions close to 20% compared to the Control. Previous studies have reported a lower sensitivity of the *Lolium* genus to IMI

residues, suggesting that phytotoxicity may depend on factors such as application rate, soil properties, and environmental conditions, with no marked effects observed during early development stages [28–31].

Legume species also showed significant reduction in emergence when sown in soils with a history of IMI herbicide use compared to the Control (Figure 1). This reduction was more pronounced in soils from the upper layer (0–15 cm), with a 35% decrease in *T. pratense* and 30% in both *T. repens* and *L. corniculatus*. In the case of *T. repens*, similar reductions in emergence have been reported at application rates 280 g a.i. ha⁻¹ of imazapyr. These results highlight both the differential sensitivity among species and the importance of the time interval between herbicide application and sowing [30,32]. However, in the present study, the longer interval between herbicide application and sowing observed in the IMI-1 treatment, compared to IMI-2, did not result in significant differences in emergence. This indicates that the time elapsed alone was not sufficient to reduce the residual (carryover) effect of IMI herbicides in the sampled soils.

On the other hand, although significant interaction was observed among species, depth, and herbicide use history, no consistent effect of sampling depth on emergence was detected. This suggests that there was no clear pattern of IMI residue accumulation in the deeper layers of the soil profile. In fact, the literature reports that these herbicides are often uniformly distributed within the top 15 cm of the soil profile, regardless of whether the system is conventional or no-till and may even be transported upward by mass flow to more superficial soil layers [11,33].

2.5.1.2. Plant height

Plant height measurements taken at 35 and 70 DAS showed significant effects ($p < 0.05$) for two-way interactions among the studies factors (Table S5; Figures 2 and 3). This indicates that the growth response of the forage species was influenced by the different combinations of factors, including herbicide use history, soil depth, and/or the species-specific sensitivity.

In the interaction between herbicide use history and soil depth at 35 DAS (Figure 2a), a general reduction in plant height was observed in IMI-1 treatment

compared to the Control. The most pronounced decrease occurred under IMI-2, indicating greater exposure to or residual effect (carryover) of the herbicide in soils with recent IMI applications. At 70 DAS, plants showed good recovery capacity in the deeper soil layer (16–30 cm), which may suggest lower herbicide residue concentrations at this depth (Figure 3a). This pattern is consistent with the results observed for the emergence variable. Additionally, the recovery observed in plant height could also be associated with increased tolerance to herbicide residues in the soil as vegetative development progresses in the different species [34,35].

The interaction between herbicide use history and species revealed greater sensitivity in grasses when grown in IMI-2 soils, particularly at early stages (35 DAS, Figure 2b). At 70 DAS, plant height in *F. arundinacea* and *L. perenne* did not differ significantly among soils with a history of IMI use, but remained lower than in the Control. This behavior suggests dynamic species-specific responses at different stages of development (Figure 3b). In contrast, legumes showed less pronounced differences, with similar heights between the Control and IMI-1, or no significant differences at 35 DAS for *T. repens*. It is important to note that this species exhibited particularly slow development up to 35 DAS, even in the Control treatment, and only at 70 DAS was it possible to distinguish IMI-2 from the other land use conditions (Figure 3b). The occurrence of temperatures below 15 °C may have delayed *T. repens* development, as several authors indicate that temperatures above this threshold are more favorable for rapid establishment [36].

The interaction between depth and species (Figures 2c and 3c) indicates that, in general, grasses exhibited lower sensitivity to IMI use compared to legumes, showing greater plant height at both soil depths (0–15 cm and 16–30 cm) at both 35 and 70 DAS. This suggests that plant height depends more on species and herbicide use history than on soil depth. In this context, it is important to consider morphological differences in growth patterns, particularly between legumes and grasses, which directly influence plant size.

The plant height response patterns observed in this study are consistent with previous research reporting differential species sensitivity to IMI herbicides residues. Several authors have described height reductions in *L. multiflorum* ranging from 30%

to 50% at application rates of 140 g a.i. ha⁻¹ of imazapyr + imazapic, while for *F. arundinacea*, *T. repens* and *L. corniculatus*, reductions of up to 100% have been reported [37–39]. Growth inhibition is considered one of the most characteristic effects of ALS-inhibiting herbicides, as they block the biosynthesis of essential branched-chain amino acids (valine, leucine, and isoleucine) [37,38,40]. The lack of these amino acids disrupts protein synthesis and cell growth, leading to growth inhibition and, lethal doses, plant death [40]. In our bioassays, this effect was expressed phenotypically as visibly shorter plants across sensitive species.

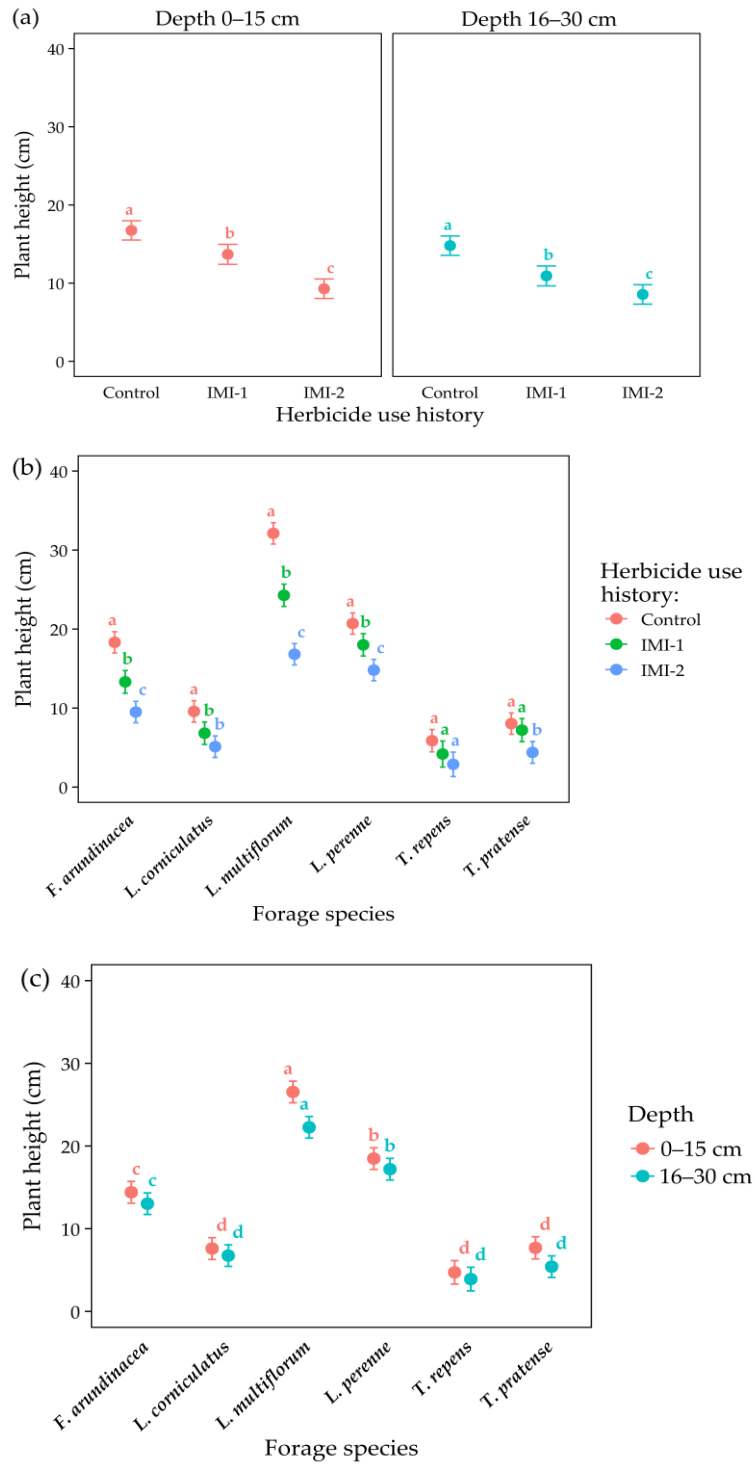


Figure 2. Plant height (cm) of different forage species 35 days after sowing (DAS), as affected by three interactions: (a) herbicide use history $\times$ depth, (b) herbicide use history $\times$ forage species, and (c) depth $\times$ forage species, INIA 2025. Different letters indicate significant differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

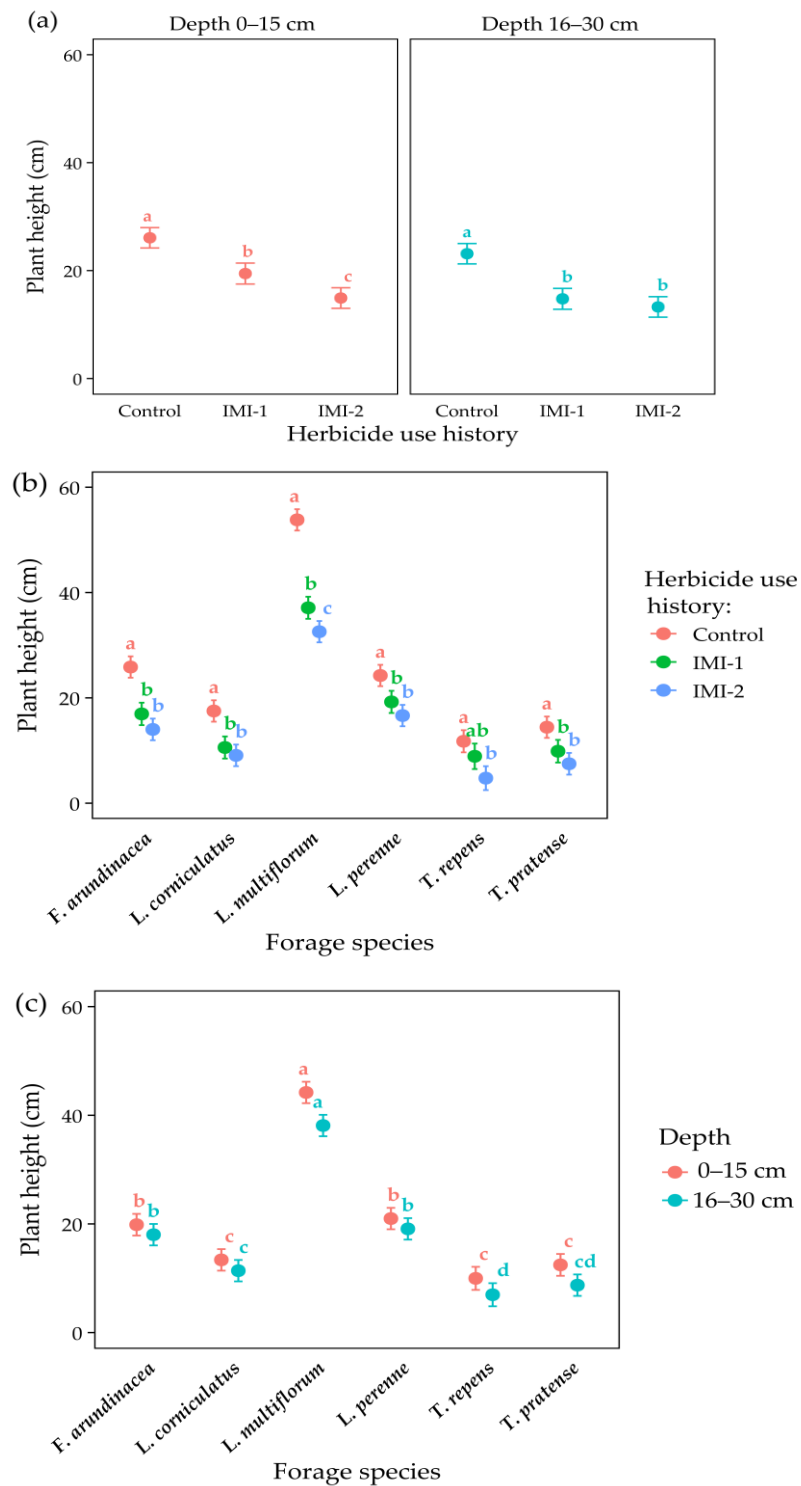


Figure 3. Plant height (cm) of different forage species 70 days after sowing (DAS), as affected by three interactions: (a) herbicide use history $\times$ depth, (b)

herbicide use history $\times$ forage species, and (c) depth $\times$ forage species, INIA 2025. Different letters indicate significant differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

2.5.1.3. Shoot and Root Dry Mass

Shoot and root dry mass evaluations showed significant effects ($p < 0.05$) for two-way interactions among the study's factors (Tables S6 and S7; Figures 4 and 5). In the herbicide use history $\times$ depth interaction (Figures 4a and 5a), a significant reduction in both shoot and root biomass accumulation was observed in soils with a history of IMI herbicide use (IMI-1 and IMI-2) compared to the Control, particularly in the upper soil layer (0–15 cm). This reduction was more pronounced under IMI-2, consistent with the patterns observed for emergence and plant height at 70 DAS. In contrast, at the 16–30 cm depth, no differences in shoot and root dry mass accumulation were found between IMI soils, again suggesting that lower herbicide residue concentrations at this depth [34,35].

In the herbicide use history $\times$ species interaction (Figures 4b and 5b), *L. multiflorum* showed the greatest reduction in shoot dry mass (SDM) in soils with the most recent herbicide use, with values of 1.431, 0.642 and 0.418 g·plant⁻¹ for the Control, IMI-1 and IMI-2 respectively. For root dry mass (RDM), *F. arundinacea* and *L. perenne* also showed reductions compared to the Control, although no significant differences were found between IMI-1 and IMI-2. In contrast, *L. corniculatus* and *T. repens* appeared more tolerant, with no significant differences in RDM accumulation across herbicide use histories compared to the Control (Figure 5b). Phenotypically, this was expressed as visibly smaller plants with less developed root systems in the sensitive species, while tolerant legumes maintained root biomass comparable to the Control.

Similarly, reductions in dry mass accumulation of *L. multiflorum* and *F. arundinacea* of approximately 80% and 100%, respectively, have been reported when these forage species were sown after the use of IMI herbicides in rice cultivation [38,39,41,42]. For *L. corniculatus* and *T. repens*, similar findings have been reported, showing no reductions in dry mass under different application rates of imazapyr + imazapic [31,32]. In this context, studies conducted in warmer regions of

Brazil have proposed *L. corniculatus* and *T. repens* as potential phytoremediator species. These studies reported over 90% reductions in IMI residue concentrations in the soil when these legumes were cultivated in rotation [38,43,44].

The greater tolerance of legumes to imidazolinone residues has been attributed to their ability to contribute nitrogen, enhancing the degradation of these compounds in the soil solution. Additionally, the higher lignin content in legume cell walls compared to grasses may promote sorption of IMI herbicides into more soluble fractions [43]. Conversely, other studies have reported reductions of approximately 80% in shoot dry mass in legumes such as *L. corniculatus* and *T. repens* under IMIs treatments [38], indicating that legume tolerance may be context dependent.

Regarding the depth x species interaction (Figures 4c and 5c), the dry mass accumulation pattern was similar to that observed for plant height, reinforcing the trend that the observed differences depend more on species-specific morphological traits than on soil depth. This differential tolerance to IMI herbicide residues highlights the varying potential of each species for use in scenarios with a risk of imidazolinone carryover.

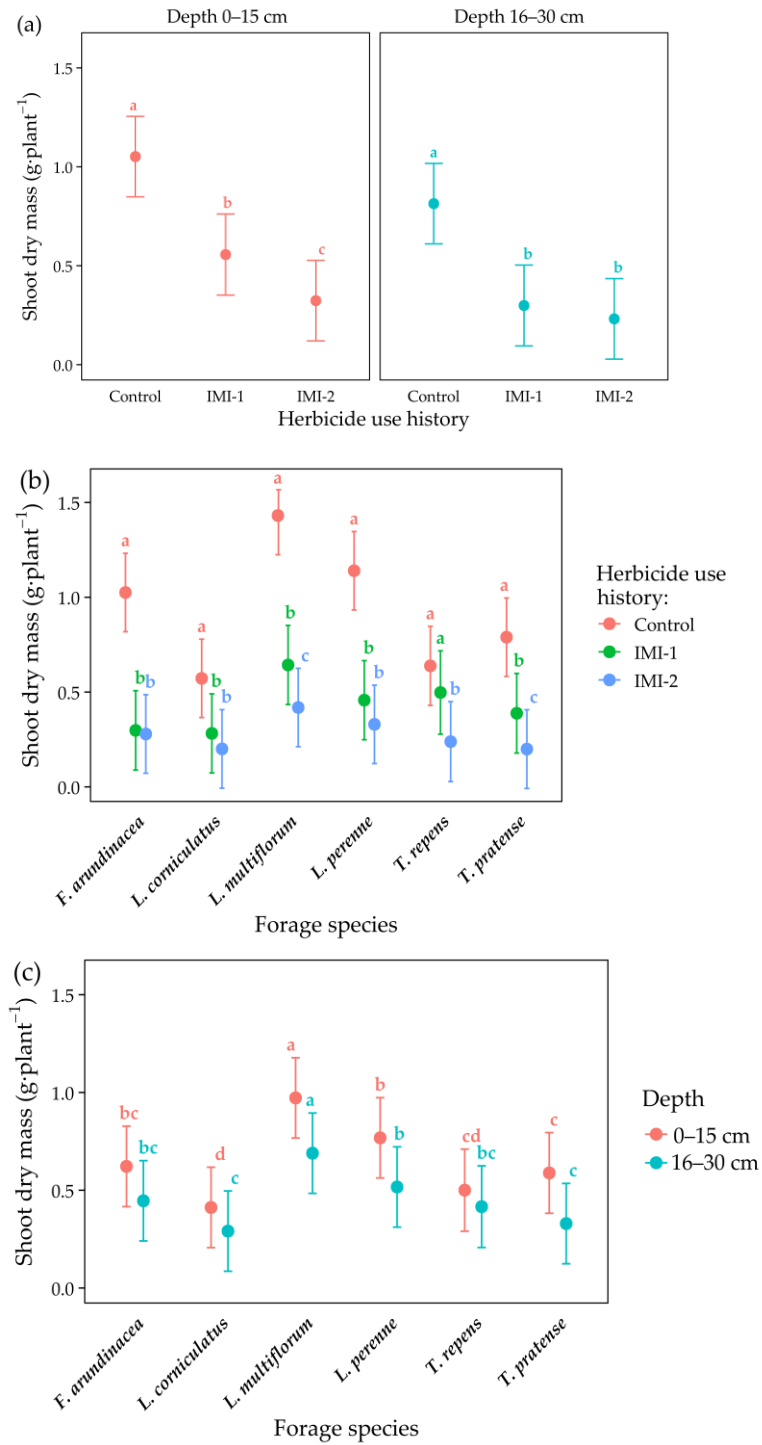


Figure 4. Shoot dry mass (g·plant⁻¹) as affected by three interactions: (a) herbicide use history × depth, (b) herbicide use history × forage species, and (c) depth × forage species, INIA 2025. Different letters indicate significant differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

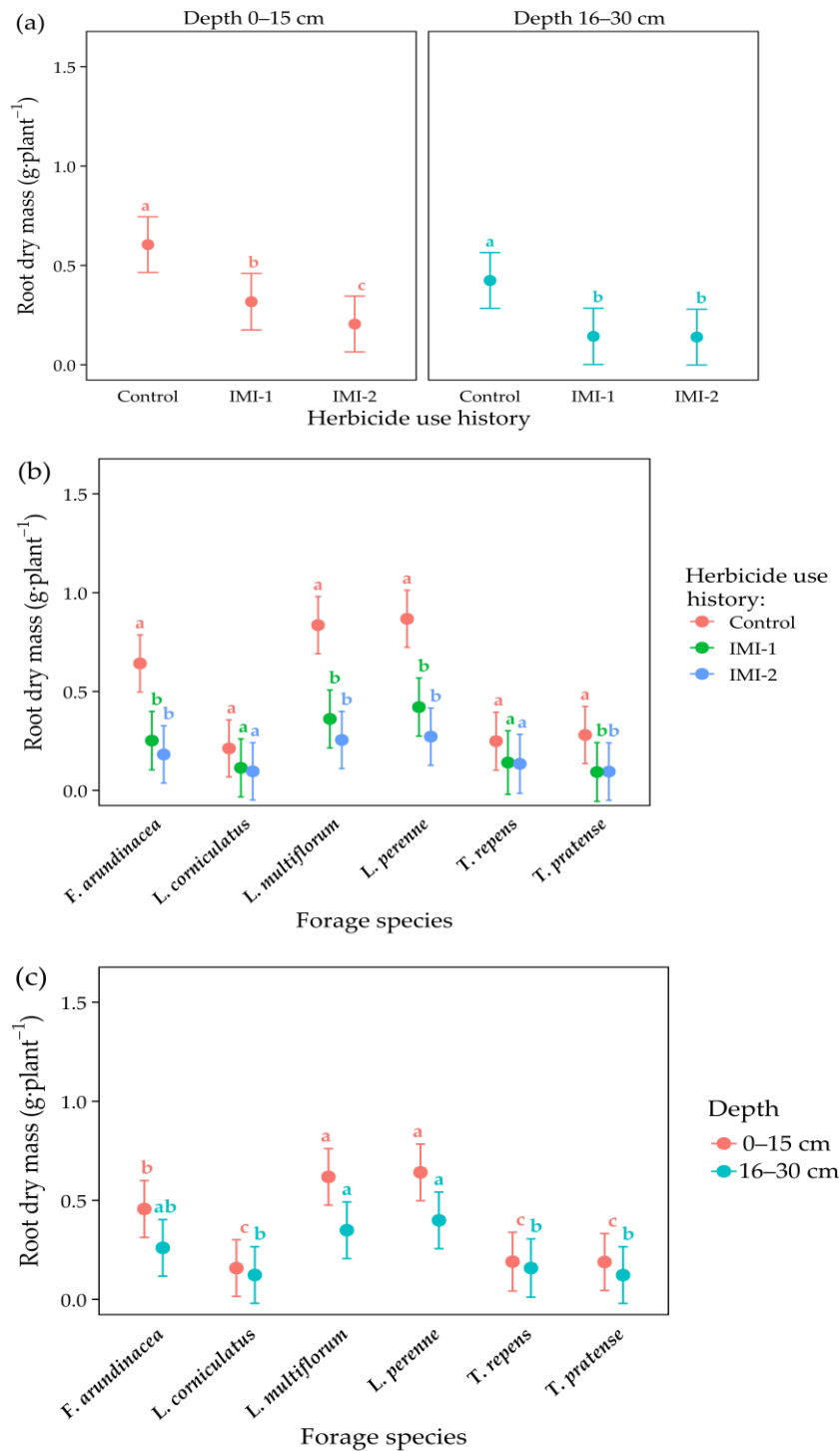


Figure 5. Root dry mass (g·plant⁻¹) as affected by three interactions: (a) herbicide use history × depth, (b) herbicide use history × forage species, and (c) depth × forage species, INIA 2025. Different letters indicate significant differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

2.5.2. Multivariate Analysis

In the global principal component analysis (PCA) (Figure 6), which included Control, IMI-1, and IMI-2 soils, the first two components explained 57.6% of the total variance (Dim1 = 33.1%; Dim2 = 24.5%). Soil textural variables, particularly sand, silt, and clay, were strongly associated with Dim1, contributing 30.9%, 26.3% and 19.9%, respectively. Sand showed a negative association, whereas silt and clay were positively correlated. In contrast, plant response variables—especially shoot dry mass (SDM) and plant height—were more represented in Dim2, contributing 26.0% and 21.3%, respectively. Soil pH also showed a clear negative association with this dimension (21.4%). Although emergence and organic carbon (OC) are represented in the biplot, their main contribution was expressed in Dim3 (31.0% and 30.1%, respectively) (Table S8). These results indicate that soils with higher silt content tend to favor plant development, while sandier and more acidic soils are associated with lower emergence and shoot biomass.

The PCA conducted by herbicide use history revealed consistent general patterns (Figure 7a–c; Tables S9–S11). In all cases, soil texture variables (sand, silt, and clay) were primarily associated with Dim1, while SDM, pH, and OC were mainly linked to Dim2. Emergence and plant height showed greater representation in Dim3. A positive association between SDM and height with silt and organic carbon was particularly evident in soils with prior IMI use. In these soils, the contribution of favorable edaphic conditions to improved forage species development was more pronounced.

The results of the multivariate analysis were consistent with findings reported in the literature regarding the influence of soil properties on the persistence and bioavailability of IMI herbicides. Soils with higher clay content—such as those from Treinta y Tres or UEPL—tend to promote herbicide adsorption, which reduces immediate bioavailability to plants but prolongs persistence within the soil profile [12,45,46]. In contrast, soils with a low organic matter content and sandy loam texture—such as those from Rio Branco or Tacuarembó—tend to retain imazapyr + imazapic residues in more bioavailable form, thereby increasing their phytotoxic potential [22].

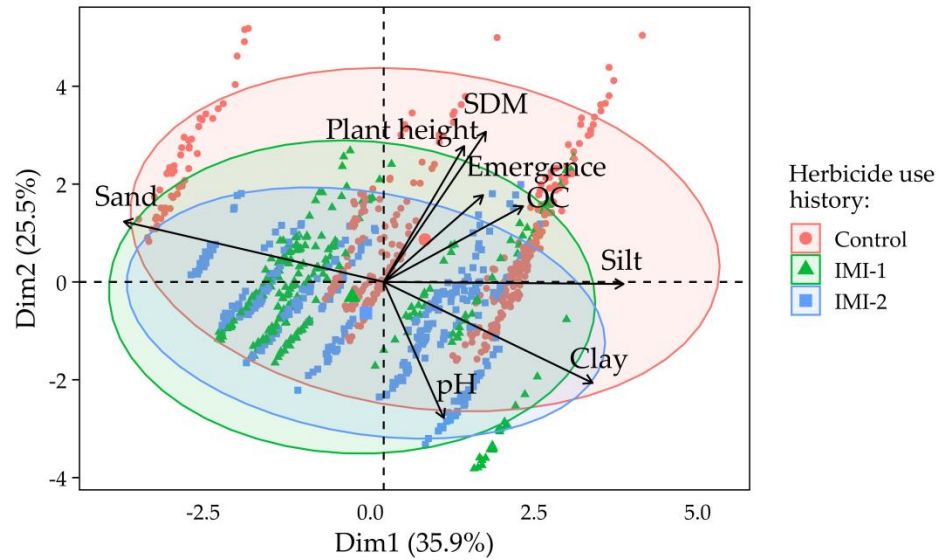


Figure 6. Principal component analysis (PCA) of the relationships between early plant development variables (emergence, plant height, and shoot dry mass, SDM) and soil physicochemical properties (sand, clay, silt, pH and organic carbon, OC) according to the herbicide use history: Control (no herbicide use), IMI-1 (application in the previous growing season, ≈ 17 months before sampling) and IMI-2 (application in the most recent growing season, ≈ 5 months before sampling). Each point represents a group of samples classified by herbicide use history, with 95% confidence ellipses. Arrows indicate the direction and contribution of each variable to the first two principal components.

These mechanisms align with the patterns observed in the PCA, where soil texture variables were associated with the dimensions explaining the greatest variance in the dataset and were related to plant response variables. In particular, soils with higher proportions of silt and organic carbon were more closely associated with improved forage performance. Taken together, these results support that the interaction between soil properties and the presence of IMI herbicide residues strongly influences pasture establishment success—even more than 17 months after the last herbicide application [41,42,47].

In summary, the evaluation of emergence, plant height, and shoot and root dry mass revealed consistent differences in forage species responses to imidazolinone residues. The multivariate analysis further integrated these patterns, highlighting the

combined influence of soil properties and herbicide use history on pasture establishment. Nevertheless, some methodological considerations must be acknowledged. First, the greenhouse conditions (restricted pot volume, prior drying of soils, and daily irrigation) differ from flooded field conditions and may underestimate IMIs persistence under anaerobic environments. Second, a single composite soil sample was used per condition, which optimized the assessment of species responses under homogeneous conditions but may not fully capture natural soil heterogeneity. Future studies incorporating multiple independent composites per treatment would allow a better representation of soil variability and strengthen inference.

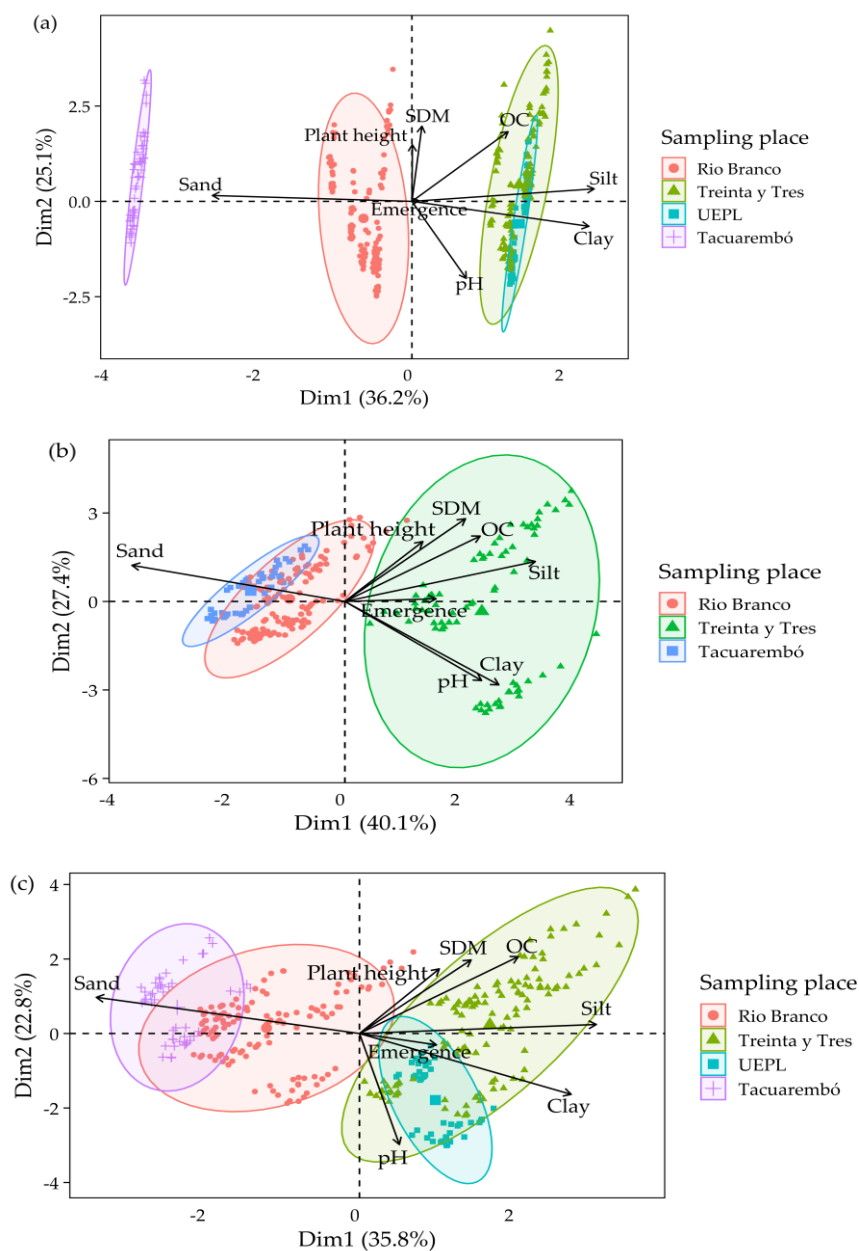


Figure 7. Principal component analysis (PCA) of the relationships between early plant development variables (emergence, plant height, and shoot dry mass, SDM) and soil physicochemical properties (sand, clay, silt, pH and organic carbon, OC) according to the imidazolinone herbicide use history: (a) Control (no herbicide use), (b) IMI-1 (application in the previous growing season, ≈17 months before sampling), and (c) IMI-2 (application in the most recent growing season, ≈5 months before sampling). Each point represents an individual sample, grouped by sampling site (Rio Branco, Treinta y Tres, UEPL, Tacuarembó), with 95% confidence ellipses.

Arrows indicate the direction and contribution of each variable to the first two principal components.

2.6. Conclusions

This study provides novel experimental evidence of the carryover effects of imazapyr + imazapic residues by testing six forage species in soils collected from rice cultivated with IMI herbicides. The approach highlights a methodological innovation that allows the evaluation of species-specific responses under real production histories.

The emergence and early growth of six forage species were significantly affected by IMIs residues in soils with a history of application in imidazolinone-tolerant rice. Differences in species sensitivity were evident, as reflected in emergence, growth, and biomass. Phenotypically, sensitive species exhibited visibly shorter plants with reduced biomass accumulation and poorly developed root systems. Among legumes, *T. repens* and *L. corniculatus* showed comparatively higher tolerance, whereas *T. pratense* was strongly affected, highlighting the importance of evaluating species individually rather than by functional group. Grasses were generally the most affected, with *F. arundinacea* showing higher sensitivity under these conditions.

These results underscore the importance of considering not only the choice of forage species, but also the history of IMI herbicide use and the soil's physical and chemical properties. The interaction between these factors can strongly influence pasture establishment and productivity, particularly in cropping systems that include IMI-tolerant crops. From a practical perspective, in loamy-sand soils with recent IMI applications (IMI-2), *T. repens* and *L. corniculatus* appear as safer options for establishment, while more sensitive species such as *F. arundinacea* may require greater caution and favorable soil conditions to succeed. Future studies incorporating quantitative analyses of herbicide residues in soil, together with field-based evaluations under varying environmental conditions, will be essential for improving management recommendations and reducing establishment failures.

2.7. Supplementary Materials

Table S1. Soil Characterization – Year 2021

Herbicide-use history	Sampling Place	Depth (cm)	pH	OC (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Control	RB	0-15	5.5	1.37	33	47	20
Control	RB	16-30	6.4	0.55	31	45	24
IMI-1	RB	0-15	5.3	1.30	37	39	24
IMI-1	RB	16-30	6.1	0.67	40	32	28
IMI-2	RB	0-15	5.7	0.89	35	38	28
IMI-2	RB	16-30	7.2	0.52	34	37	27
Control	TyT	0-15	5.3	1.94	16	51	33
Control	TyT	16-30	5.6	0.97	16	50	34
IMI-1	TyT	0-15	6.5	3.70	24	50	26
IMI-1	TyT	16-30	6.6	0.81	25	46	28
IMI-2	TyT	0-15	5.4	1.49	20	48	33
IMI-1	TyT	16-30	6.3	0.84	19	48	33

Table S2. Soil Characterization – Year 2022

Herbicide Use History	Sampling Place	Depth (cm)	pH	OC (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Control	RB	0-15	5.7	1.17	37	35	28
Control	RB	16-30	6.5	0.71	33	33	34
IMI-1	RB	0-15	5.1	0.60	37	39	24
IMI-1	RB	16-30	6.1	0.45	40	32	28
IMI-2	RB	0-15	5.0	0.70	35	38	28
IMI-2	RB	16-30	5.9	0.66	40	32	29
Control	UEPL	0-15	5.4	1.35	14	50	36
Control	UEPL	16-30	6.5	0.75	14	49	36
IMI-2	UEPL	0-15	6.2	0.81	22	46	32
IMI-2	UEPL	16-30	7.7	0.52	17	47	36
Control	TyT	0-15	5.2	1.62	15	46	39
Control	TyT	16-30	5.8	0.98	16	43	42
IMI-1	TyT	0-15	6.3	1.52	20	44	36
IMI-1	TyT	16-30	8.6	0.72	14	41	45
IMI-2	TyT	0-15	5.1	2.04	15	48	37
IMI-2	TyT	16-30	6.5	0.92	14	37	49

Table S3. Soil Characterization – Year 2023

Herbicide Use History	Sampling Place	Depth (cm)	pH	Nitrogen (%)	OC (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Control	RB	0-15	5.0	0.05	0.90	35	44	21
Control	RB	16-30	6.2	0.15	0.65	33	38	29
IMI-1	RB	0-15	5.3	0.06	0.65	40	39	21
IMI-1	RB	16-30	6.3	0.03	0.52	37	34	29
IMI-2	RB	0-15	5.4	0.06	0.77	41	38	20
IMI-2	RB	16-30	5.4	0.04	0.59	42	34	25
Control	TyT	0-15	5.4	0.11	1.43	15	53	33
Control	TyT	16-30	6.3	0.05	0.81	15	48	37
IMI-2	TyT	0-15	5.5	0.10	1.30	21	51	28
IMI-2	TyT	16-30	6.6	0.04	0.61	23	41	37
Control	Tac	0-15	4.8	0.07	1.09	62	22	16
Control	Tac	16-30	5.4	0.02	0.49	60	23	16
IMI-1	Tac	0-15	5.4	0.11	1.30	43	37	20
IMI-1	Tac	16-30	6.6	0.02	0.64	47	32	21
IMI-2	Tac	0-15	5.2	0.06	0.89	51	33	16
IMI-2	Tac	16-30	6.5	0.05	0.81	49	31	21

Table S4. Analysis of Deviance Table (Type II Wald Chi-Square Tests) – Emergence

Term	Chi-Square	Df	Pr(>Chi)	Significance
Herbicide-use history	1604.561	2	< 2.2e-16	***
Species	416.101	5	< 2.2e-16	***
Depth	0.330	1	0.5656	
Herbicide-use h × Species	44.218	10	3.01e-06	***
Herbicide-use h × Depth	4.155	2	0.1253	
Species × Depth	5.606	5	0.3464	
Herbicide-use h × Species × Depth	26.206	10	0.0035	**

Note: Significance codes: *** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

Table S5. Analysis of Deviance Table (Type II Wald Chi-Square Tests) –
Plant height 35 y 70 DAS

Plant height 35 DAS				
Term	Chi-Square	Df	Pr(>Chi)	Significance
Herbicide-use history	301.922	2	< 2.2e-16	***
Species	1596.501	5	< 2.2e-16	***
Depth	25.075	1	5.52e-07	***
Herbicide-use h × Species	107.342	10	< 2.2e-16	***
Herbicide-use h × Depth	6.216	2	0.0447	*
Species × Depth	11.855	5	0.0368	*
Herbicide-use h × Species × Depth	11.588	10	0.3136	
Plant height 70 DAS				
Term	Chi-Square	Df	Pr(>Chi)	Significance
Herbicide-use history	389.890	2	< 2.2e-16	***
Species	2178.142	5	< 2.2e-16	***
Depth	37.269	1	1.03e-09	***
Herbicide-use h × Species	100.944	10	< 2.2e-16	***
Herbicide-use h × Depth	6.100	2	0.0474	*
Species × Depth	9.975	5	0.0760	.
Herbicide-use h × Species × Depth	10.591	10	0.3903	

Note: Significance codes: *** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

Table S6. Analysis of Deviance Table (Type II Wald Chi-Square Tests) –
Shoot dry mass

Term	Chi-Square	Df	Pr(>Chi)	Significance
Herbicide-use history	626.194	2	< 2.2e-16	***
Species	196.196	5	< 2.2e-16	***
Depth	68.103	1	< 2.2e-16	***
Herbicide-use h × Species	87.173	10	1.94e-14	***
Herbicide-use h × Depth	10.073	2	0.0065	**
Species × Depth	10.202	5	0.0697	.
Herbicide-use h × Species × Depth	8.453	10	0.5847	

Note: Significance codes: *** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

Table S7. Analysis of Deviance Table (Type II Wald Chi-Square Tests) – Root dry mass

Term	Chi-Square	Df	Pr(>Chi)	Significance
Herbicide-use history	211.506	2	< 2.2e-16	***
Species	214.656	5	< 2.2e-16	***
Depth	43.318	1	4.65e-11	***
Herbicide-use h × Species	69.439	10	5.69e-11	***
Herbicide-use h × Depth	6.805	2	0.0333	*
Species × Depth	18.697	5	0.0022	**
Herbicide-use h × Species × Depth	6.668	10	0.7564	

Note: Significance codes: *** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

Table S8. Global Principal Component Analysis (PCA).

Variable	Dim.1 Contribution (%)	Dim.1 cos ²	Dim.2 Contribution (%)	Dim.2 cos ²	Dim.3 Contribution (%)	Dim.3 cos ²
SDM	4.78	0.137	26.03	0.532	0.77	0.009
Emergence	4.52	0.130	8.70	0.178	31.03	0.358
Height	2.96	0.085	21.30	0.435	12.35	0.142
pH	1.65	0.048	21.37	0.436	16.05	0.185
OC	8.88	0.255	6.62	0.135	30.13	0.347
Sand	30.90	0.888	4.20	0.086	0.21	0.002
Silt	26.33	0.757	0.01	0.000	6.78	0.078
Clay	19.97	0.574	11.77	0.240	2.68	0.031

Note: Variables with high contributions (>20%) and cos² values close to 1 are best represented in the respective dimensions.

Table S9. Control - Principal Component Analysis (PCA).

Variable	Dim.1 Contribution (%)	Dim.2 Contribution (%)	Dim.3 Contribution (%)
SDM	0.086	27.62	2.39
Emergence	0.039	0.00	42.95
Height	0.0	15.65	36.06
pH	2.53	29.0	10.79
OC	7.92	23.74	6.86
Sand	34.1	0.16	0.0
Silt	28.48	0.76	0.42
Clay	26.84	3.04	0.5

Note: Variables with high contributions (>20%) and cos² values close to 1 are best represented in the respective dimensions.

Table S10. IMI-1 - Principal Component Analysis (PCA).

Variable	Dim.1 Contribution (%)	Dim.2 Contribution (%)	Dim.3 Contribution (%)
SDM	8.49	22.21	0.207
Emergence	4.85	0.02	50.18
Height	3.55	11.64	27.78
pH	10.91	20.28	0.116
OC	10.68	13.86	12.92
Sand	26.48	4.24	1.24
Silt	21.18	5.17	7.28
Clay	13.86	22.55	0.26

Note: Variables with high contributions (>20%) and $\cos^2$ values close to 1 are best represented in the respective dimensions.

Table S11. IMI-2 - Principal Component Analysis (PCA).

Variable	Dim.1 Contribution (%)	Dim.2 Contribution (%)	Dim.3 Contribution (%)
SDM	5.62	16.37	10.29
Emergence	2.67	0.39	34.27
Height	2.87	13.64	30.32
pH	0.71	37.29	9.38
OC	11.37	17.86	11.35
Sand	31.22	3.96	1.54
Silt	25.30	0.24	2.33
Clay	20.21	11.21	0.48

Note: Variables with high contributions (>20%) and $\cos^2$ values close to 1 are best represented in the respective dimensions.

2.8. References

1. Deambrosi, E. Rice Production System in Uruguay and Its Sustainability. In Proceedings of the III International Conference of Temperate Rice, Punta del Este, Uruguay, 10–13 March 2003.
2. Vilela, L.; Martha, G.B., Jr.; Marchão, R.L.; Guimarães, R., Jr.; Barioni, L.G.; Barcellos, A.d.O. Integração Lavoura-Pecuária. In *Savanas: Desafios e Estratégias para o Equilíbrio Entre Sociedade, Agronegócio e Recursos Naturais*; Faleiro, F.G., de Farias Neto, A.L., Eds.; Embrapa Cerrados: Fortaleza, Brazil, 2008; Volume 1, ISBN 978-85-7075-039-6.
3. Lemaire, G.; Franzluebbers, A.; Carvalho, P.C.d.F.; Dedieu, B. Integrated Crop–Livestock Systems: Strategies to Achieve Synergy Between Agricultural Production and Environmental Quality. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2014**, *190*, 4–8. [[CrossRef](#)]
4. Kaspar, T.E.; Zarza, R. Efecto Residual de Los Herbicidas Utilizados En Arroz Clearfield Sobre La Implantación de Pastura En Sucesión. *Rev. INIA Urug.* **2022**, *68*, 23–26.
5. DIEA (Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias). *Anuario Estadístico Agropecuario 2024*, 27th ed.; Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP): Montevideo, Uruguay, 2024.
6. Tan, S.; Evans, R.R.; Dahmer, M.L.; Singh, B.K.; Shaner, D.L. Imidazolinone-Tolerant Crops: History, Current Status and Future. *Pest Manag. Sci.* **2005**, *61*, 246–257. [[CrossRef](#)]
7. Shaner, D.; O'Connor, S. The Imidazolinone Herbicides; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1991; ISBN 978-0-203-70999-3.
8. Shaner, D.L. Herbicide Handbook; Weed Science Society of America: Lawrence, KS, USA, 2014; ISBN 978-0-615-98937-2.
9. Gehrke, V.R.; Fipke, M.V.; de Avila, L.A.; Camargo, E.R. Understanding the Opportunities to Mitigate Carryover of Imidazolinone Herbicides in Lowland Rice. *Agriculture* **2021**, *11*, 299. [[CrossRef](#)]

10. Ramezani, M.; Oliver, D.P.; Kookana, R.S.; Gill, G.; Preston, C. Abiotic Degradation (Photodegradation and Hydrolysis) of Imidazolinone Herbicides. *J. Environ. Sci. Health Part B* **2008**, *43*, 105–112. [[CrossRef](#)]
11. Kraemer, A.F.; Marchesan, E.; Grohs, M.; de Avila, L.A.; Machado, S.L.d.O.; Zanella, R.; Massoni, P.F.S.; Sartori, G.M.S. Lixiviação do imazethapyr em solo de várzea sob dois sistemas de manejo. *Cienc. Rural* **2009**, *39*, 1660–1666. [[CrossRef](#)]
12. Su, W.; Hao, H.; Ding, M.; Wu, R.; Xu, H.; Xue, F.; Shen, C.; Sun, L.; Lu, C. Adsorption and Degradation of Imazapic in Soils under Different Environmental Conditions. *PLoS ONE* **2019**, *14*, e0219462. [[CrossRef](#)]
13. de Avila, L.A.; Marchesan, E.; Camargo, E.R.; Merotto, A., Jr.; Ulguim, A.d.R.; Noldin, J.A.; Andres, A.; Mariot, C.H.P.; Agostinetto, D.; Dornelles, S.H.B.; et al. Eighteen Years of Clearfield™ Rice in Brazil: What Have We Learned? *Weed Sci.* **2021**, *69*, 585–597. [[CrossRef](#)]
14. Bundt, A.C.; Avila, L.A.; Pivetta, A.; Agostinetto, D.; Dick, D.P.; Burauel, P. Imidazolinone Degradation in Soil in Response to Application History. *Planta Daninha* **2015**, *33*, 341–349. [[CrossRef](#)]
15. Oliveira, M.L.; Marchesan, E.; Soares, C.F.; Farias, J.G.; Ulguim, A.d.R.; Fleck, A.G.; Coelho, L.L. Persistence of Imazapyr+imazapic in Irrigated Rice Area and Effect on Soybean Due to Soil Moisture and Phytoremediation in the Off-Season. *Bragantia* **2019**, *78*, 306–316. [[CrossRef](#)]
16. Pinto, J.J.O.; Noldin, J.A.; Pinho, C.F.; Rossi, F.; Galon, L.; Almeida, G.F. Atividade residual de (imazethapyr+imazapic) para sorgo granífero (*Sorghum bicolor*) semeado em rotação com o arroz irrigado. *Planta Daninha* **2009**, *27*, 1015–1024. [[CrossRef](#)]
17. Marchesan, E.; Santos, F.M.D.; Grohs, M.; Avila, L.A.D.; Machado, S.L.O.; Senseman, S.A.; Massoni, P.F.S.; Sartori, G.M.S. Carryover of Imazethapyr and Imazapic to Nontolerant Rice. *Weed Technol.* **2010**, *24*, 6–10. [[CrossRef](#)]
18. Chiapinotto, D.M.; Avila, L.A.; Aranha, B.C.; Viana, V.E.; Benedetti, L.; Araújo, B.O.N.; Camargo, E.R. Potential Reduction of Non-Imidazolinone Rice

- Grain Yield by Imidazolinone Soil Residual Activity. *Adv. Weed Sci.* **2024**, *42*, e020240044. [[CrossRef](#)]
19. Ulguim, A.R.; Carlos, F.S.; Zanon, A.J.; Ogoshi, C.; Bexaira, K.P.; Silva, P.R.F. Is Increasing Doses of Imazapyr + Imazapic Detrimental to the Main Crop Rotation Alternatives to Flooded Rice? *Planta Daninha* **2019**, *37*, e019217913. [[CrossRef](#)]
 20. Bundt, A.D.C.; Avila, L.A.; Agostinetto, D.; Nohatto, M.A.; Vargas, H.C. Carryover of Imazethapyr + Imazapic on Ryegrass and Non-Tolerant Rice as Affected by Thickness of Soil Profile. *Planta Daninha* **2015**, *33*, 357–364. [[CrossRef](#)]
 21. Saldain, N.; Bermudez, R.; Serrón, N.; Sosa, B. Efecto de la dosis de Kifix y del manejo del riego en la productividad inicial de la pradera subsiguiente. *Ser. Act. Difus.* **2014**, *735*, 11–13.
 22. Saldain, N.; López, A.; Sosa, B. Persistencia y actividad biológica del Kifix en suelos arroceros en el Este del Uruguay. *Ser. Act. Difus.* **2014**, *735*, 17–19.
 23. Saldain, N.; López, A.; Sosa, B. 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. *Ser. Act. Difus.* **2014**, *735*, 14–16.
 24. Neal, J. Conducting a Bioassay for Herbicide Residues. N.C. Cooperative Extension, NC State University. Available online: https://content.ces.ncsu.edu/conducting-a-bioassay-for-herbicide-residues#section_heading_8801 (accessed on 1 June 2025).
 25. Klein, R.; Bernards, M.; Shea, P. *A Quick Test For Herbicide Carry-Over in the Soil*; University Nebraska–Lincoln Extension Publications: Lincoln, NE, USA, 2008.
 26. Instituto Nacional de Semillas. Available online: <https://www.inase.uy/Certificacion/EstandaresProduccion.aspx> (accessed on 1 June 2025).
 27. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2025.

28. Wixson, M.B.; Shaw, D.R. Effects of Soil-Applied AC 263,222 on Crops Rotated with Soybean (*Glycine max*). *Weed Technol.* **1992**, *6*, 276–279. [[CrossRef](#)]
29. Alister, C.; Kogan, M. Efficacy of Imidazolinone Herbicides Applied to Imidazolinone-Resistant Maize and Their Carryover Effect on Rotational Crops. *Crop Prot.* **2005**, *24*, 375–379. [[CrossRef](#)]
30. Guimarães, S.; Galon, L.; Lima, A.; Bastiani, M.O.; Belarmino, J.G.; Burg, G.M.; Zadoná, R.R.; Coneço, G.; Silva, A.F. Espécies Tolerantes Aos Herbicidas Do Grupos Das Imidazoinonas Com Potencial de Uso Em Fitorremediação. In Proceedings of the XXVIII Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas na era da Biotecnologia, Campo Grande, MS, Brasil, 3–6 September 2012.
31. Saldain, N.; Bermudez, R.; Serrón, N.; Sosa, B. Efecto del Kifix (Imazapir + Imazapic) Asperjado En El Arroz Clearfield Sobre Las Plantas Forrajeras Subsiguientes En El Este del Uruguay. *Ser. Act. Difus.* **2012**, *686*, 32–37.
32. Zaccaro, M.L.M.; Byrd, J.D., Jr.; Russell, D.P. Tolerance of Several Legumes to Residual Imazapyr Applied Under Greenhouse Conditions. *Weed Technol.* **2018**, *32*, 66–71. [[CrossRef](#)]
33. Bundt, A.D.C.; de Avila, L.A.; Pinto, J.J.d.O.; dos Santos, T.T.; Agostinetto, D.; Martins, K. Transporte ascendente da mistura formulada de imazethapyr e imazapic em resposta à profundidade do lençol freático. *Cienc. Rural* **2013**, *43*, 1597–1604. [[CrossRef](#)]
34. Shaw, D.R.; Watkins, R.M.; Garris, S.B., Jr.; Cole, A.W. *Forage Species Tolerante to Imazapyr and Imazapic*; MAFES Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station: Mississippi State, MS, USA, 2001.
35. Shinn, S.L.; Thill, D.C. Tolerance of Several Perennial Grasses to Imazapic. *Weed Technol.* **2004**, *18*, 60–65. [[CrossRef](#)]
36. Chu, L.; Gao, Y.; Chen, L.; McCullough, P.E.; Jespersen, D.; Sapkota, S.; Bagavathiannan, M.; Yu, J. Impact of Environmental Factors on Seed Germination and Seedling Emergence of White Clover (*Trifolium repens* L.). *Agronomy* **2022**, *12*, 190. [[CrossRef](#)]

37. Pinto, J.J.O.; Noldin, J.A.; Rosenthal, M.D.; Pinho, C.F.; Rossi, F.; Machado, A.; Piveta, L.; Galon, L. Atividade residual de (imazethapyr + imazapic) sobre azevém anual (*Lolium multiflorum*), semeado em sucessão ao arroz irrigado, sistema clearfield®. *Planta Daninha* **2009**, *27*, 609–619. [[CrossRef](#)]
38. Galon, L.; Lima, A.M.; Guimarães, S.; Belarmino, J.G.; Burg, G.M.; Concenção, G.; Bastiani, M.O.; Beutler, A.N.; Zandona, R.R.; Radünz, A.L. Potential of Plant Species for Bioremediation of Soils Applied with Imidazolinone Herbicides. *Planta Daninha* **2014**, *32*, 719–726. [[CrossRef](#)]
39. Santos, L.O.; Pinto, J.J.O.; Piveta, L.B.; Noldin, J.A.; Galon, L.; Concenção, G. Carryover Effect of Imidazolinone Herbicides for Crops Following Rice. *Am. J. Plant Sci.* **2014**, *5*, 1049–1058. [[CrossRef](#)]
40. Tranel, P.J.; Wright, T.R. Resistance of Weeds to ALS-Inhibiting Herbicides: What Have We Learned? *Weed Sci.* **2002**, *50*, 700–712. [[CrossRef](#)]
41. Avila, L.A.; Marchezan, M.; François, T.; Cezimbra, D.M.; Souto, K.M.; Refatti, J.P. Injury Caused by the Formulated Mixture of the Herbicide Imazethapyr and Imazapic in Raygrass as Affected by Soil Moisture. *Planta Daninha* **2010**, *28*, 1041–1046. [[CrossRef](#)]
42. Giménez, J.P.; Istilart, C.M.; Giménez, D.O.; Yannicari, M. Evaluación de la residualidad de imidazolinonas sobre la implantación de trigo, avena y alfafa/ryegrass luego del cultivo de girasol imi-tolerante. *Ser. Inf. Tec.* **2014**, *5*, 124–128.
43. Souto, K.M.; de Avila, L.A.; Cassol, G.V.; Machado, S.L.d.O.; Marchesan, E. Phytoremediation of Lowland Soil Contaminated with a Formulated Mixture of Imazethapyr and Imazapic1. *Rev. Ciênc. Agron.* **2015**, *46*, 185–192. [[CrossRef](#)]
44. Souto, K.M.; Jacques, R.J.S.; Zanella, R.; Machado, S.L.d.O.; Balbinot, A.; Avila, L.A. de Phytostimulation of Lowland Soil Contaminated with Imidazolinone Herbicides. *Int. J. Phytoremediation* **2020**, *22*, 774–780. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
45. Ulbrich, A.V.; Souza, J.R.P.; Shaner, D. Persistence and Carryover Effect of Imazapic and Imazapyr in Brazilian Cropping Systems. *Weed Technol.* **2005**, *19*, 986–991. [[CrossRef](#)]

46. Gianelli, V.R.; Bedmar, F.; Costa, J.L. Persistence and Sorption of Imazapyr in Three Argentinean Soils. *Environ. Toxicol. Chem.* **2014**, *33*, 29–34. [[CrossRef](#)]
47. Wang, Q.; Liu, W. Correlation of Imazapyr Adsorption and Desorption with Soil Properties. *Soil Sci.* **1999**, *164*, 411.

3. Discusión y conclusiones generales

Los resultados obtenidos en este trabajo confirman que la emergencia y desarrollo inicial de especies forrajeras sembradas sobre suelos previamente cultivados con arroz tolerante a imidazolinonas se ven afectadas por el efecto residual de los herbicidas imazapyr + imazapic. La magnitud fue dependiente de la especie, el uso del suelo relacionado a los herbicidas y las características físico-químicas del suelo.

Independientemente del tipo de suelo, la profundidad de muestreo y del intervalo de tiempo entre las aplicaciones (diecisiete y cinco meses, IMI-1 e IMI-2, respectivamente), la emergencia de las especies forrajeras se redujo en suelos con antecedentes de uso de imidazolinonas. A diferencia de lo observado en este estudio, Zaccaro et al. (2018) reportaron una recuperación en el porcentaje de emergencia de *T. repens* a medida que el intervalo entre la aplicación y la siembra se extendió de 0 a 6 meses. No obstante, otros autores como Alister y Kogan (2005) informaron disminuciones en el número de plantas.m² de especies como *Beta vulgaris*, *Capsicum annuum* y *Lycopersicum esculentum*, incluso cuando fueron sembradas 140 y 300 días después de la aplicación de imazapyr + imazapic. Asimismo, en el caso de *Lolium multiflorum*, estos autores no detectaron efectos en el establecimiento de plantas, lo que podría coincidir con el menor efecto sobre la emergencia observada en este trabajo para las especies de este género.

En relación con la altura de plantas, las respuestas variaron según la especie, el historial de uso de herbicidas y la profundidad de muestro. *F. arundinacea* y *L. perenne* lograron aumentar el crecimiento entre los 35 y 70 DDS, mientras que *T. pratense* y *T. repens* mostraron mayor tolerancia en la etapa más temprana del desarrollo. Estos resultados son consistentes con reportes previos en *L. multiflorum*, *F. arundinacea*, *L. corniculatus*, *Zea mays*, *T. repens* y *Glycine max* donde se obtuvieron disminuciones de altura en suelos tratados con inhibidores de ALS (Galon et al., 2014; Zaccaro et al., 2018). La reducción en altura constituye, además, una característica clásica de la acción de las imidazolinonas (Duggleby et al., 2008).

En cuanto a la acumulación de biomasa, *L. corniculatus* y *T. repens* evidenciaron mayor tolerancia relativa que las gramíneas, lo que refuerza el patrón diferencial entre grupos funcionales. Entre las leguminosas, ambas especies mostraron mayor estabilidad en el desarrollo radicular ante los diferentes historiales de uso de herbicidas. Esta capacidad de sostener un sistema radicular activo en la presencia de residuos herbicidas puede constituir un mecanismo de tolerancia, al favorecer tanto la absorción de recursos como la disipación de compuestos en el suelo (Souto et al., 2020). Por otro lado, los resultados obtenidos en materia seca de parte aérea coinciden con lo señalado por Avila et al. (2010), Galon et al. (2014), Pinto, Noldin, Rosenthal et al. (2009) y Zaccaro et al. (2018), quienes reportaron disminuciones en esta variable ante la aplicación de herbicidas imazapyr + imazapic.

El análisis de componentes principales permitió evidenciar diferencias claras entre los suelos en función de su textura. En los suelos más livianos, los efectos más marcados sobre las especies se podrían traducir en residuos más biodisponibles. En cambio, en los suelos más pesados, la retención de los herbicidas podría haber reducido parcialmente su biodisponibilidad biológica. En este sentido, Firmino et al. (2008) reportaron, para suelos con diferentes texturas, la sorción de imazapyr y encontraron que en aquellos con bajo tenor de materia orgánica y alto contenido de arena la sorción era baja. Para el mismo compuesto, Gianelli et al. (2014), en tres suelos argentinos, informaron que la vida media de imazapyr se asociaba positivamente con el contenido de arcilla de los suelos.

Los resultados obtenidos en este trabajo resaltan la importancia de tener en cuenta qué especies forrajeras se deben seleccionar para integrar a la rotación con cultivos tolerantes a IMI. La inclusión de una fase de pasturas con especies más tolerantes o con potencial fitoremedidor a residuos de IMI no solo contribuye a prolongar el intervalo de degradación de los herbicidas, sino que además permite amortiguar los riegos de fitotoxicidad en las especies sensibles. Este aspecto es particularmente relevante en los suelos livianos, donde la residualidad puede afectar la implantación incluso después de diecisiete meses (quinientos días) desde la última aplicación. La rotación con pasturas se reafirma, de este modo, como una herramienta central para la sustentabilidad de los sistemas arroz-ganadería, al

combinar beneficios productivos y de apoyo para la disipación de herbicidas residuales.

Es necesario considerar, sin embargo, la limitación metodológica de este estudio, en donde los resultados provienen de bioensayos realizados bajo condiciones controladas de invernáculo. Aunque estos permiten una detección sensible de los efectos residuales, no reproducen completamente las condiciones de campo, donde influyen factores como variabilidad climática, prácticas de manejo, la dinámica microbiana y los períodos de inundación o drenaje (Sekutowski, 2011). Por lo tanto, los hallazgos deben interpretarse como una aproximación al potencial de los efectos residuales más que como una cuantificación directa de su magnitud bajo condiciones productivas.

A futuro, esta línea de investigación debería ampliarse a otras especies utilizadas en rotación con cultivos tolerantes a IMI. En particular, con implantación de ensayos a campo que consideren la variabilidad ambiental y cuantificación directa de residuos en el suelo, lo que permitiría fortalecer las recomendaciones de manejo y afinar las estrategias de rotación en diferentes contextos productivos.

4. **Bibliografía**

- Aichele, T. M. y 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>
- Alister, C. y Kogan, M. (2005). Efficacy of imidazolinone herbicides applied to imidazolinone-resistant maize and their carryover effect on rotational crops. *Crop Protection*, 24(4), 375-379. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2004.09.011>
- Anderson, W. (1996). *Weed science: Principles and applications* (3^a ed.). West Publishing Company. <https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500030035x>
- Anzalone, A., Ruíz, M., Zambrano, C. y Ortiz, A. (2011). Evaluación de Zea mays L. y phaseolus vulgaris L. como bioindicadores de herbicidas imidazolinonas en suelo. *Bioagro*, 23(2), 121-128.
- Avila, L. A., Marchezan, M., François, T., Cezimbra, D. M., Souto, K. M. y Refatti, J. P. (2010). Toxicidade da mistura formulada de imazethapyr e imazapic sobre o azevém em função do teor de umidade do solo [número especial]. *Planta Daninha*, 28, 1041-1046. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582010000500012>
- Basham, G. W. y Lavy, T. L. (1987). Microbial and Photolytic Dissipation of Imazaquin in Soil. *Weed Science*, 35(6), 865-870. <https://doi.org/10.1017/S0043174500079480>
- Bonilla, O. y Grierson, J. (1982). *Un sistema de producción de carne en rotación con arroz*. Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger.
- Bresnahan, G., Dexter, A., Koskinen, W. y Lueschen, W. (2002). Influence of soil pH-sorption interactions on the carry-over of fresh and aged soil residues of imazamox. *Weed Research*, 42(1), 45-51. <https://doi.org/10.1046/J.1365-3180.2002.00261.X>
- Bundt, A. C., Avila, L. A., Pivetta, A., Agostinetto, D., Dick, D. P. y Burauel, P. (2015). Imidazolinone degradation in soil in response to application history.

- Planta Daninha*, 33(2), 341-349. <https://doi.org/10.1590/0100-83582015000200020>
- Bundt, A. D. C., Avila, L. A., Agostinetto, D., Nohatto, M. A. y 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>
- Chiapinotto, D. M., Avila, L. A., Aranha, B. C., Viana, V. E., Benedetti, L., Araújo, B. O. N. y Camargo, E. R. (2024). Potential reduction of non-imidazolinone rice grain yield by imidazolinone soil residual activity. *Advances in Weed Science*, 42 e020240044. <https://doi.org/10.51694/ADVWEEDSCI/2024;42:00029>
- Croughan, T., Utomo, H., Sanders, D. y Braverman, M. (1996). Herbicide-resistant rice offers potential solution to red rice problem. *Louisiana Agriculture*, 39(4), 10-12.
- De Faccio Carvalho, P. C., Savian, J. V., Chiesa, T. Della, De Souza Filho, W., Terra, J. A., Pinto, P., Martins, A. P., Villarino, S., Da Trindade, J. K., De Albuquerque Nunes, P. A. y Pineiro, G. (2021). Land-Use Intensification Trends in The Rio de la Plata Region of South America: Toward Specialization or Recoupling Crop and Livestock Production. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 8(1), 97-110. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020380>
- Deambrosi, E. (2003, 10-13 de marzo). *Rice production system in Uruguay and its sustainability*. 3.^a Conferencia Internacional de Arroz de Clima Templado, Punta del Este.
- Delouche, J. C., Burgos, N. R., Gealy, D. R., Zorrilla, G., Labrada, R., Larinde, M. y Rosell, C. (2007). *Weedy rices: origin, biology, ecology and control*. Food and Agriculture Organization.
- Denardin, L. G. de O., Martins, A. P., Carmona, F. de C., Veloso, M. G., Carmona, G. I., Carvalho, P. C. de F. y Anghinoni, I. (2020). Integrated crop–livestock systems in paddy fields: New strategies for flooded rice nutrition. *Agronomy Journal*, 112(3), 2219-2229. <https://doi.org/10.1002/AGJ2.20148>

- Dirección de Estadísticas Agropecuarias (DIEA). (2024). *Anuario estadístico agropecuario 2024*.
- Duggleby, R. G., McCourt, J. A. y Guddat, L. W. (2008). Structure and mechanism of inhibition of plant acetohydroxyacid synthase. *Plant Physiology and Biochemistry*, 46(3), 309-324. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2007.12.004>
- Firmino, L. E., Tuffi Santos, L. D., Ferreira, F. A., Ferreira, L. R. y Tiburcio, R. A. S. (2008). Sorção do imazapyr em solos com diferentes texturas. *Planta Daninha*, 26(2), 395-402. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582008000200016>
- Flint, J. L. y Witt, W. W. (1997). Microbial degradation of imazaquin and imazethapyr. *Weed Science*, 45(4), 586-591. <https://doi.org/10.1017/S004317450008886X>
- Franzluebbers, A. J. (2007). Integrated crop-livestock systems in the southeastern USA. *Agronomy Journal*, 99(2), 361-372. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2006.0076>
- Galon, L., Guimarães, S., Lima, A. M. de, Concenço, G., Krolow, I. R. C. y Ferreira, E. A. (2014). Influência de herbicidas do grupo das imidazolinonas em características fisiológicas de plantas cultivadas no inverno. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, 20(1-2), 41-50.
- Gehrke, V. R., Fipke, M. V., de Avila, L. A. y Camargo, E. R. (2021). Understanding the opportunities to mitigate carryover of imidazolinone herbicides in lowland rice. *Agriculture*, 11(4), 299. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040299>
- Gianelli, V., Bedmar, F. y Monterubbianesi, M. G. (2011). Persistencia del herbicida Imazapir en el suelo y efectos fitotóxicos sobre cultivos de invierno y de verano. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 37(1), 18-25.
- Gianelli, V. R., Bedmar, F. y Costa, J. L. (2014). Persistence and sorption of imazapyr in three Argentinean soils. *Environmental toxicology and chemistry*, 33(1), 29-34. <https://doi.org/10.1002/ETC.2400>
- Helgueira, D. B., Rosa, T. D., Moura, D. S., Galon, L. y Pinto, J. J. O. (2019). Leaching of Imidazolinones in Irrigation Systems in Rice Cultivation: Sprinkling and Flooding. *Planta Daninha*, 37. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582019370100005>

- Herbicide Resistance Action Committee (HRAC). (s. f.). *2024 HRAC Global Herbicide MoA Classification* <https://www.hracglobal.com>
- Junkes, G. V., Avila, L. A., Kemmerich, M., Gehrke, V. R., Fipke, M. V. y Camargo, E. R. (2022). Imidazolinone herbicide dissipation in rice fields as affected by intermittent and continuous irrigation. *Advances in Weed Science*, 40. <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2022;40:00006>
- Klein, R. N., Bernards, M. L. y Shea, P. J. (2008). *A Quick Test for Herbicide Carry-Over in The Soil: Know How. Know* [Webinar]. University of Nebraska–Lincoln. <https://extensionpubs.unl.edu/publication/g1891/na/html/view>
- Kraemer, A. F., Marchesan, E., Grohs, M., de Avila, L. A., Machado, S. L. de O., Zanella, R., Massoni, P. F. S. y Sartori, 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>
- Little, L. D. y Shaner, L. D. (1991). Absorption and Translocation of the Imidazolinone Herbicides. En L. D. Shaner y L. S. O'Connor (eds.), *The Imidazolinone Herbicides* (pp. 53-70). CRC Press.
- Livore, A. B. (2010). Nueva variedad de arroz no transgénica resistente a herbicidas. En C. Torres (ed.), *INTA expone sus aportes al país* (pp. 25-26). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Macedo, I., Roel, A., Velazco, J. I., Bordagorri, A., Terra, J. A. y Pittelkow, C. M. (2022). Intensification of rice-pasture rotations with annual crops reduces the stability of sustainability across productivity, economic, and environmental indicators. *Agricultural Systems*, 202, 103488. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2022.103488>
- Mangels, G. (1991). Behavior of the imidazolinone herbicides in soil. En D. L. Shaner y L. O'Connor (eds.), *The Imidazolinone herbicides* (pp. 191-210). CRC Press.
- Marchesan, E., Santos, F. M. Dos, Grohs, M., Avila, L. A. De, Machado, S. L. O., Senseman, S. A., Massoni, P. F. S. y Sartori, G. M. S. (2010). Carryover of Imazethapyr and Imazapic to Nontolerant Rice. *Weed Technology*, 24(1), 6-10. <https://doi.org/10.1614/WT-08-153.1>

- Martini, L. F. D., Avila, L. A., Souto, K. M., Cassol, G. V., Refatti, J. P., Marchesan, E. y Barros, C. A. P. (2011). Lixiviação de imazethapyr + imazapic em função do manejo de irrigação do arroz. *Planta Daninha*, 29(1), 185-193. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582011000100021>
- Mas, C. (1976). *Región este*. Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger.
- Mas, C. (1996). *Consideraciones sobre la implantación de pasturas en rastrojos de arroz*. Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger.
- McDowell, R. W., Condrón, L. M., Main, B. E. y Dastgheib, F. (1997). Dissipation of imazapyr, flumetsulam and thifensulfuron in soil. *Weed Research*, 37(6), 381-389. <https://doi.org/10.1046/J.1365-3180.1997.D01-73.X>
- Monaco, T. J., Weller, S. C. y Ashton, F. M. (2002). *Weed science: principles and practices*. (4.^a ed.). Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Neal, J. (2021). *Conducting a Bioassay for Herbicide Residues* [Webinar]. NC State Extension Publications. <https://content.ces.ncsu.edu/conducting-a-bioassay-for-herbicide-residues>
- Oliveira Júnior, R. S. y Regitano, J. B. (2009). Dinâmica de pesticidas no solo. *Química e Mineralogia do Solo*, 2.
- Oliveira, M. L., Marchesan, E., Soares, C. F., Farias, J. G., Ulguim, A. da R., Fleck, A. G. y 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), 306-316. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20190074>
- Pinto, J. J. O., Noldin, J. A., Pinho, C. F., Rossi, F., Galon, L. y Almeida, G. F. (2009). Atividade residual de (imazethapyr+imazapic) para sorgo granífero (*Sorghum bicolor*) semeado em rotação com o arroz irrigado [número especial]. *Planta Daninha*, 27, 1015-1024. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582009000500015>
- Pinto, J. J. O., Noldin, J. A., Rosenthal, M. D., Pinho, C. F., Rossi, F., Machado, A., Piveta, L. y Galon, L. (2009). Residual activity of (imazethapyr+imazapic) on ryegrass (*Lolium multiflorum*), following clearfield® rice. *Planta Daninha*, 27(3), 609-619. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582009000300023>

- Ramezani, M., Oliver, D. P., Kookana, R. S., Gill, G. y 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>
- Refatti, J. P., de Avila, L. A., Agostinetto, D., Manica-Berto, R., Bundt, A. D. C. y Elgueira, D. B. (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>
- Rosas, J. E., Bonnacarrère, V. y de Vida, F. P. (2014). One-step, codominant detection of imidazolinone resistance mutations in weedy rice (*Oryza sativa*). *Electronic Journal of Biotechnology*, 17(2), 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2014.02.003>
- Rovira, P., Buffa, I. y Zorrilla, G. (2019). ¿Cómo están hoy los sistemas Arroz-Pasturas? Primeros pasos para articular la investigación que se viene. *Revista INIA*, (56), 5-10.
- Saldain, N., Bermúdez, R., Serrón, N., López, A. y Sosa, B. (2014). *Efecto de la dosis de Kifix y del manejo del riego en la productividad inicial de la pradera siguiente*. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Saldain, N., Bermúdez, R., Serrón, N. y Sosa, B. (2012). *Efecto del Kifix (Imazapir + Imazapic) asperjado en el arroz clearfield sobre las plantas forrajeras subsiguientes en el este del Uruguay*. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Saldain, N., López, A. y Sosa, B. (2014). *Efecto del Kifix asperjado en arroz clearfield sobre el raigrás subsiguiente seguido por arroz sin resistencia (no clearfield) o sorgo forrajero en siembra directa*. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Santos, L. O., Pinto, J. J. O., Piveta, L. B., Noldin, J. A., Galon, L., Concenço, G., Santos, L. O., Pinto, J. J. O., Piveta, L. B., Noldin, J. A., Galon, L. y Concenço, G. (2014). Carryover Effect of Imidazolinone Herbicides for Crops Following Rice. *American Journal of Plant Sciences*, 5(8), 1049-1058. <https://doi.org/10.4236/AJPS.2014.58117>

- Schreiber, F., Scherner, A., Massey, J. H., Zanella, R. y Avila, L. A. (2017). Dissipation of Clomazone, Imazapyr, and Imazapic Herbicides in Paddy Water under Two Rice Flood Management Regimes. *Weed Technology*, 31(2), 330-340. <https://doi.org/10.1017/WET.2017.5>
- Scursoni, J. A., Montoya, J. C., Vigna, M. R., Gigón, R., Istilart, C., Pugni, J. P. R., López, R. y Porfiri, C. (2017). Impact of Imazamox and Imazapyr Carryover on Wheat, Barley, and Oat. *Weed Technology*, 31(6), 838-846. <https://doi.org/10.1017/WET.2017.66>
- Sekutowski, T. (2011). Application of Bioassays in Studies on Phytotoxic Herbicide Residues in the Soil Environment. En A. Kortekamp (ed.), *Herbicides and Environment* (pp. 253-272). InTech. <https://doi.org/10.5772/12931>
- Senseman, S. A. y Armbrust, K. (2007). *Herbicide handbook* (9.^a ed.). Weed Science Society of America.
- Shaner, D. L. (2014). *Herbicide Handbook*. (10.^a ed.). Weed Science Society of America.
- Shaner, D. L. y Hornford, R. (2005). Soil interactions of imidazolinone herbicides used in Canada. En R. C. Van Acker (ed.), *Soil residual herbicides: science and management* (2.^a ed., pp. 23-30). Canadian Weed Science Society.
- Shaner, D. L. y O'Connor, S. (1991). *The imidazolinone herbicides*. CRC Press.
- Smith, J. (1988). Weed Thresholds in Southern U.S. Rice, *Oryza sativa*. *Weed Technology*, 2(3), 232-241. <https://doi.org/10.1017/S0890037X00030505>
- Souto, K. M., Jacques, R. J. S., de Avila, L. A., Machado, S. L. de O., Zanella, R. y Refatti, J. P. (2013). Biodegradação dos herbicidas imazetapir e imazapique em solo rizosférico de seis espécies vegetais. *Ciência Rural*, 43(10), 1790-1796. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013001000010>
- Souto, K. M., Jacques, R. J. S., Zanella, R., Machado, S. L. de O., Balbinot, A. y Avila, L. A. de. (2020). Phytostimulation of lowland soil contaminated with imidazolinone herbicides. *International Journal of Phytoremediation*, 22(7), 774-780. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1710814>
- Souza, M. F., Neto, M. D. C., Marinho, M. I., Saraiva, D. T., Faria, A. T., Silva, A. A. y Silva, D. V. (2016). Persistência no Solo de Herbicidas Utilizados no

- Sistema Clearfield®. *Planta Daninha*, 34(3), 589-596.
<https://doi.org/10.1590/S0100-83582016340300020>
- Su, W., Hao, H., Ding, M., Wu, R., Xu, H., Xue, F., Shen, C., Sun, L. y Lu, C. (2019). Adsorption and degradation of imazapic in soils under different environmental conditions. *Plos One*, 14(7).
<https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0219462>
- Tan, S., Evans, R. R., Dahmer, M. L., Singh, B. K. y Shaner, D. L. (2005). Imidazolinone-tolerant crops: history, current status and future. *Pest Management Science*, 61(3), 246-257. <https://doi.org/10.1002/PS.993>
- Topolansky, E. (1975). *El arroz: su cultivo y producción*. Hemisferio Sur.
- Ulbrich, A. V., Souza, J. R. P. y Shaner, D. (2005). Persistence and Carryover Effect of Imazapic and Imazapyr in Brazilian Cropping Systems. *Weed Technology*, 19(4), 986-991. <https://doi.org/10.1614/WT-04-208R2.1>
- Ulgium, A. R., Carlos, F. S., Zanon, A. J., Ogoshi, C., Bexaira, K. P. y Silva, P. R. F. (2019). Is Increasing Doses of Imazapyr + Imazapic Detrimental to the Main Crop Rotation Alternatives to Flooded Rice? *Planta Daninha*, 37. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582019370100148>
- Wang, Q. y Liu, W. (1999). Correlation of imazapyr adsorption and desorption with soil properties. *Soil science*, 164(6), 411-416.
<https://doi.org/10.1097/00010694-199906000-00005>
- Watson, P. R. y Checkel, S. (2005). Soil residual herbicide bioassays: Science and practice. En R. C. Van Acker (ed.), *Soil residual herbicides: science and management* (2.^a ed., pp. 71-79). Canadian Weed Science Society.
- Zaccaro, M. L. M., Byrd, J. D. y Russell, D. P. (2018). Tolerance of Several Legumes to Residual Imazapyr Applied Under Greenhouse Conditions. *Weed Technology*, 32(1), 66-71. <https://doi.org/10.1017/WET.2017.79>
- Kaspary, T. y Zarza, R. (2022). Efecto residual de los herbicidas utilizados en arroz clearfield sobre la implantación de pasturas en sucesión. *Revista INIA*, (68), 23-26.