

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VOLATILIZACIÓN DE DIFERENTES
FORMULACIONES DE 2,4-D Y DICAMBA EN EL CULTIVO DE SOJA**

por

**Lucía Belén CAREAC CENTANARO
María del Pilar ZABALVEYTIA NAVEIRO**

**Trabajo final de grado
presentado como uno de
los requisitos para obtener
el título de Ingeniero
Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2023**

Trabajo final de grado aprobado por:

Directora: _____

Ing. Agr. Dra. Juana Villalba

Tribunal: _____

Ing. Agr. Dr. Antonio Sozzi

Ing. Agr. MSc. Luciana Rey

Ing. Agr. Dra. Juana Villalba

Fecha: 29 de setiembre de 2023

Estudiantes: _____

Lucía Belén Careac Centanaro

María del Pilar Zabalveytia Naveiro

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	2
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	5
RESUMEN.....	7
SUMMARY	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DE SOJA Y EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA.....	11
2.1.1 Tecnología Enlist.....	13
2.1.2 Tecnología Xtend y XtendFlex	14
2.2 VOLATILIZACIÓN.....	14
2.2.1 Propiedades del suelo que afectan la volatilización	15
2.2.2 Factores ambientales que afectan la volatilización.....	16
2.2.2.1 Temperatura	17
2.2.2.2 Humedad relativa.....	18
2.2.2.3 Velocidad del viento	18
2.3 PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DE LOS HERBICIDAS QUE DETERMINAN LA VOLATILIZACIÓN.....	19
2.3.1 Presión de vapor	19
2.3.2 Solubilidad	21
2.4 HERBICIDAS UTILIZADOS	22
2.4.1 2,4-D y sus formulaciones	22
2.4.2 Dicamba	23
2.5 SÍNTOMAS DE DAÑO POR 2,4-D Y DICAMBA EN SOJA SUSCEPTIBLE.....	24
2.6 HIPÓTESIS BIOLÓGICA.....	25
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1 LOCALIZACIÓN.....	26
3.2 EXPERIMENTO 1	26
3.2.1 Diseño experimental y Tratamientos	26

3.2.2	Metodología del experimento.....	27
3.2.3	Análisis estadístico	28
3.3	EXPERIMENTO 2	28
3.3.1	Diseño experimental y Tratamientos	28
3.3.2	Metodología del experimento.....	28
3.3.3	Análisis estadístico	29
3.4	EXPERIMENTO 3	29
3.4.1	Diseño experimental y Tratamientos	29
3.4.2	Metodología del experimento.....	30
3.4.3	Análisis estadístico	35
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1	EXPERIMENTO 1	36
4.2	EXPERIMENTO 2	39
4.3	EXPERIMENTO 3	43
5.	CONCLUSIONES	49
6.	BIBLIOGRAFÍA	50
7.	ANEXOS.....	57

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla No.	Página
Tabla No. 1. Clasificación de herbicidas por su presión de vapor y aplicación.....	20
Tabla No. 2. Volatilidad del plaguicida según constante de Henry.....	21
Tabla No. 3. 2,4-D, formas asociadas, y características que influyen en la volatilización	22
Tabla No. 4. Propiedades que influyen en la volatilización del ácido y sal dimetilamina de Di camba.....	23
Tabla No. 5. Descripción de los tratamientos evaluados	26
Tabla No. 6. Descripción de las formulaciones utilizadas	30
Tabla No. 7. Condiciones meteorológicas al momento de la aplicación	31
Tabla No. 8. Análisis de varianza para las evaluaciones de daño a las 12, 24, 48 horas y del daño y peso fresco a los 10 días post aplicación.....	36
Tabla No. 9. Medias de porcentaje de la población con daño superior a 0,2 a las 24 HPA.....	37
Tabla No. 10. Porcentaje de plantas con cada nivel de daño, en la evaluación a los 5 DPA.....	37
Tabla No. 11. Peso fresco de las unidades evaluadas	38
Tabla No. 12. Análisis de varianza de las medias del porcentaje de la población, con daño superior a 0,1 en la evaluación de las 24 y 48 horas y > a 0.2 en la evaluación a los 10 DPA	39
Tabla No. 13. Análisis de varianza de las medias del porcentaje de la población, con daño superior a 0,2 en la evaluación de las 48 horas, 10 y 21 días post aplicación ...	43
Tabla No. 14. Porcentaje de la población con daño superior a 0,2 en la evaluación de las 48 HPA para la interacción orientación x exposición	44
Tabla No. 15. Porcentaje del tiempo según dirección del viento, por período de exposición.....	44
Tabla No. 16. Velocidad del viento promedio por período de exposición y valores máximos y mínimos registrados.....	45
Tabla No. 17. Porcentaje de la población con daño superior a 0,2 a las 48 HPA para la interacción formulación 2,4-D x distancia	45
Tabla No. 18. Porcentaje de la población con daño > 2 a los 21 DPA para la interacción formulación 2,4-D x orientación	47
Tabla No. 19. Porcentaje de la población con daño > 2 a los 21 DPA para la interacción orientación x tiempo de exposición	47
Tabla No. 20. Porcentaje de la población con daño > 2 a los 21 DPA para la interacción formulación 2,4-D x distancia	48

Figura No.	Página
Figura No. 1. Incremento mundial de biotipos resistentes según sitio de acción.....	12
Figura No. 2. A la izquierda, macetas inmediatamente después de la aplicación y sellado; a la derecha, disposición de los tratamientos en la cámara	27
Figura No. 3. Áreas donde se dispusieron los tratamientos correspondientes a la formulación 1 y 2 en el potrero 6A de la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni	30
Figura No. 4. Condiciones meteorológicas en las siguientes 24 horas post aplicación	32
Figura No. 5. Ubicación de varillas que indican la distancia desde el área tratada, en la posición Este.....	33
Figura No. 6. Unidades experimentales colocadas luego de la aplicación	34
Figura No. 7. Porcentaje de la población con daño superior a 0.2 para cada herbicida en la evaluación de los 10 DPA.....	40
Figura No. 8. Porcentaje de la población con daño superior a 0.2 para cada condición de humedad del suelo en la evaluación de los 10 DPA	41
Figura No. 9. Porcentaje de la población con daño superior a 0.2 para cada periodo de exposición en la evaluación de los 10 DPA	42

RESUMEN

La expansión del área del cultivo de soja y el incremento de malezas de difícil control, condujo a un aumento en el uso de herbicidas, y a la adaptación de nuevas tecnologías como la Enlist (con posibilidad de aplicación en postemergencia de 2,4-D, glifosato y glufosinato de amonio). La convivencia de cultivos con tolerancia y susceptibles al herbicida 2,4-D, requieren una correcta utilización, para realizar un uso seguro y eficiente, disminuyendo los riesgos asociados a la aplicación del herbicida, especialmente la volatilización. Siendo que es uno de los procesos de pérdida que puede tener un herbicida, y que tiene grandes repercusiones tanto en cultivos sensibles, como en el ambiente y la salud humana. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo aportar información sobre algunos de los principales factores que favorecen la volatilización de los herbicidas, evaluando el efecto de las formulaciones de 2,4-D y también del herbicida dicamba, su relación con la temperatura, humedad del suelo, viento, período de exposición y distancia desde la zona de aplicación. Para ello, se utilizaron plantas de soja susceptible como especie bioindicadora, utilizando una escala de 0 a 10 para evaluar el daño por volatilización. Se realizaron 3 experimentos, utilizando el diseño en bloques completos al azar. Dos de los experimentos se realizaron bajo cámara de crecimiento, evaluando en el primero de ellos, el efecto de daño de Dicamba y 3 formulaciones de 2,4-D, a 15°C, 25°C y 35°C en suelo húmedo y seco. El segundo, utilizando los mismos herbicidas que el experimento 1, en suelo húmedo y seco, con 5 periodos de exposición a los tratamientos. Por último, el tercer experimento fue a campo, en el potrero 6A de la estación experimental Mario A. Cassinoni de la Facultad de Agronomía, donde se evaluó el efecto de daño por 2,4-D dimetilamina y 2,4-D colina aplicados en un área de 30 m², a 3 distancias de la zona de aplicación, y 4 tiempos de exposición. Los mayores valores en el daño por volatilización, se registraron cuando la temperatura fue de 25°C. La humedad del suelo tuvo influencia en el experimento 1, siendo mayor el daño cuando éste se encontraba húmedo, pero no fue claro el efecto en el experimento 2. En cuanto a las formulaciones utilizadas, hubo un efecto mayor en los daños por volatilización con 2,4-D dimetilamina y Dicamba, con respecto a las demás. El periodo de exposición tuvo un claro efecto, siendo las plantas expuestas inmediatamente luego de la aplicación y las que permanecían por más tiempo, las más afectadas por los gases volatilizados. A campo, se pudo constatar que 2,4-D colina, no generó daños por volatilización más allá de los 3 m del lugar de aplicación; y que el 2,4-D dimetilamina si lo hizo, incluso hasta los 20 m de la zona de aplicación. No se encontraron efectos claros con respecto a la dirección del viento y la disposición de las plantas en las diferentes direcciones.

Palabras Clave: volatilización, 2,4-D, Dicamba, soja, daño en soja por volatilización, factores que afectan la volatilización

SUMMARY

The expansion of the area of soybean cultivation and the increased weed of difficult control led to increased use of herbicides, and adaptation of new technologies such as Enlist (with possibility of application in post emergency of 2,4-D), glyphosate and glufosinate of ammonium. The coexistence of crops with tolerance and susceptible to herbicide 2,4-D, require a correct use, for safe and efficient use, reducing the risks associated with the application of the herbicide, especially volatilization. Being that it is one of the loss processes that a herbicide can have, and that has a high impact on sensitive crops as well as on the environment and human health. In this context, the aim of this paper was to provide information on some of the main factors that favor the volatilization of herbicides, evaluating the effects of formulations of 2,4-D, and also the herbicide Dicamba, its relationship to soil moisture, temperature, wind, exposure period and distance from the application area. For this purpose, susceptible soya plants were used as a bioindicator species using a scale of 0 to 10 to assess volatilization damage. Three experiments were performed using random complete block design. Two of the experiments were performed under the growth chamber evaluating in the first of them the damage effect of Dicamba and three formulations of 2,4-D, at 15°C, 25°C, and 35°C on wet and dry soil. The second, using the same herbicides as the experiment one, the wet and dry soil with five exposure periods of treatments. And finally, the third experiment went to field, in paddock 6A, of the Mario A. Cassinoni experimental station of the Faculty of Agronomy, where the effects of 2,4-D dimethylamine and 2,4-D choline applied in an area of 30 m² was evaluated from three distances from the application area and 4 exposure times. The highest volatilization damage values were recorded when the temperature was 25°C. The soil moisture had influence on the experiment 1, being greater damage when it was wet but was not clear effect on the experiment 2. As regards the formulations used, there was a greater effect on volatilization damage with 2,4-D, dimethylamine y Dicamba, with respect to others. The exposure period had a clear effect being the plants exposed immediately after application and those who remained longer, those most affected by volatilized gases. In the field it was found that 2,4-D choline, did not cause volatilization damage beyond 3 m instead of; and that 2,4-D dimethylamine did so up to 20 m from the application area. No clear effects were found regarding wind direction and the layout of the plants are the different directions.

Keywords: volatilization, 2,4-D, Dicamba, soybean, damage in soybean by volatilization, factors affecting volatility

1. INTRODUCCIÓN

La expansión del área de cultivos extensivos, y particularmente del cultivo de soja, ha generado cambios muy importantes en la agricultura en los últimos 20 años en Uruguay. El área destinada a dicho cultivo hasta 2001 no superaba las 10 mil hectáreas, y a partir de dicha zafra, se ha dado un incremento sostenido, siendo 981 mil las hectáreas estimadas para la zafra 2021/22, posicionándose como el principal rubro agrícola del país a través de los años (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2021). Este aumento del área ha sido impulsado por el precio internacional del grano y acompañado por el desarrollo tecnológico, que incluye la siembra directa y la soja resistente a glifosato.

Mediante la adquisición de este paquete tecnológico, el glifosato se convirtió en una herramienta imprescindible para el control de malezas, siendo incluso hoy en día una herramienta importante para el control de ciertas poblaciones de malezas. La dependencia exclusiva para el control de malezas y un uso desmedido, ha provocado un incremento considerable de biotipos de malezas resistentes con el transcurso de los años. La respuesta a esta resistencia, por parte de la industria química, fue la introducción de nuevos eventos biotecnológicos como el DAS 44406-6, autorizado por el Gabinete Nacional de Bioseguridad, que permite la producción de soja con tolerancia a los herbicidas glifosato, glufosinato de amonio y 2,4-D (Gabinete Nacional de Bioseguridad [GNBio], 2017), conocida como soja Enlist. Además, la aprobación de soja con eventos combinados, que presentan en común el evento MON 87708, el cual confiere tolerancia al herbicida Dicamba (GNBio, 2020).

Esta tecnología, es una herramienta más para evitar la pérdida de rendimientos generada por la interferencia de las malezas, pero que ocasiona nuevos desafíos para la producción. El más importante, está relacionado a su uso racional y responsable para no generar nuevas resistencias por la gran presión de selección. El otro desafío está vinculado a problemas de daño a cultivos no tolerantes, en un escenario donde formulaciones de dicamba y 2,4-D, y su uso en cultivos transgénicos de soja, probablemente resulten en muchas más aplicaciones, de las cuales podrían causar daños a la vegetación sensible no objetivo, mediante el proceso de deriva y volatilización.

La volatilización de un herbicida está determinada por las características de cada formulación, pero también está fuertemente relacionada a factores ambientales como lo son la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, así como también, propiedades de la superficie aplicada, ya sea suelo o follaje.

Existen diferencias en las formulaciones de 2,4 D, que les confieren diferencias en el potencial de volatilización. Pero en el caso de Dicamba (un herbicida clasificado como volátil), la aprobación de soja con resistencia a dicho herbicida, fue anterior a la

aprobación de formulaciones con menor volatilización que las convencionales. Esto podría causar grandes perjuicios, no solo a los cultivos sensibles que se encuentren en zonas cercanas a la aplicación, sino también al ambiente y la salud humana.

En este sentido, surge la necesidad de estudiar el potencial de daño por volatilización de distintas formulaciones de 2,4-D y la sal dimetilamina de Dicamba. Para ello, se plantearon tres experimentos, con el objetivo de evaluar cómo afecta el tipo de formulación al proceso de volatilización, y su correlación con factores predisponentes como lo son la temperatura, humedad del suelo, el tiempo de exposición y la distancia de la zona aplicada, utilizando plantas de soja susceptible como especie bioindicadora.

En el experimento 1, se evaluó el efecto de la temperatura y humedad del suelo, en el potencial de daño en plantas de soja susceptibles por la volatilización de las diferentes formulaciones de 2,4-D y Dicamba. En el experimento 2, se evaluó el efecto del tiempo de exposición y humedad del suelo, a los posibles daños ocurridos en plantas de soja expuestas a 35°C, por la volatilización de diferentes formulaciones de 2,4-D y Dicamba. Por último, en el experimento 3, se evaluó el daño en soja en condiciones de campo de dos formulaciones de 2,4-D, a diferentes distancias de la zona de aplicación y distintos períodos de exposición a los tratamientos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DE SOJA Y EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

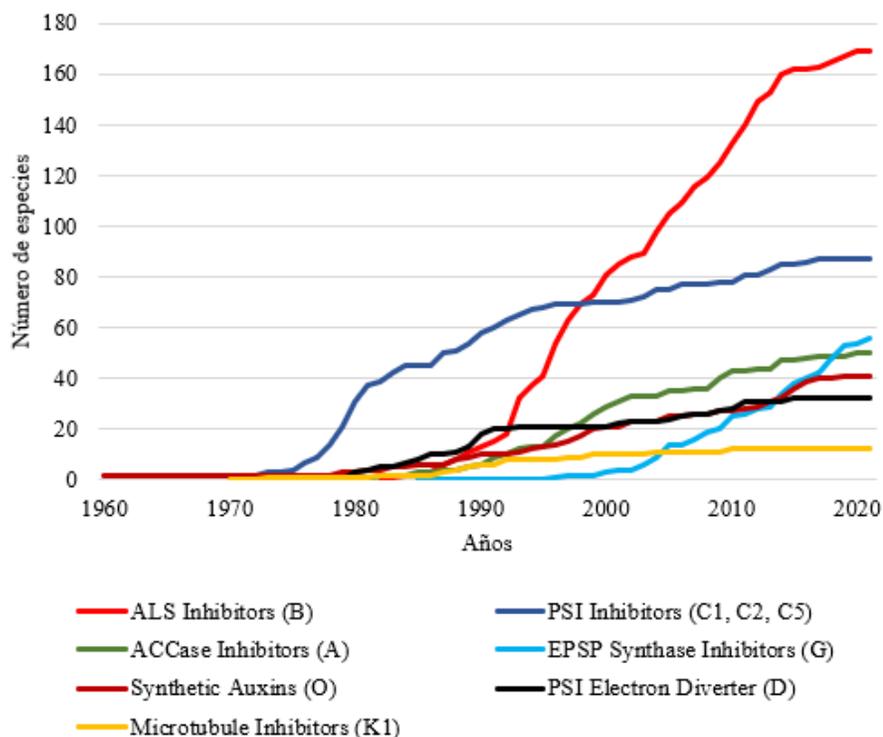
Según la Serie histórica de DIEA (s.f.), los primeros registros de producción de soja en Uruguay datan de la zafra 1964/65 con 3.388 hectáreas destinadas, siendo de poca relevancia y con grandes variaciones a lo largo de los siguientes años. Sin embargo, a partir de la zafra 2002/03 comenzó una expansión sostenida, registrando en 2014/15 la máxima superficie sembrada, con 1.330 mil hectáreas destinadas al cultivo. Dicha expansión en las últimas dos décadas, fue debido al crecimiento de la demanda por compradores extranjeros, lo cual impulsó el aumento del precio del grano. Esto atrajo inversores extranjeros interesados en la producción del cultivo, y la adopción de nuevas tecnologías para la producción (Economía.uy, 2021). Dentro de los avances tecnológicos que impulsaron este crecimiento, Monsanto fue la empresa responsable de dos grandes lanzamientos: el glifosato y la transgénesis. El glifosato, un inhibidor de la enzima enol-piruvil-shiquimato fosfato sintetasa (EPSFS), fue sintetizado por primera vez en 1950, pero en 1974 se identificó su potencial para ser utilizado en la agricultura (Ximenis Joven, 2019). A mediados de los 90' cae la patente del glifosato, con la consecuente caída del precio del producto, por lo cual, la misma empresa, lanza el evento GTS 40-3-2, conocido como soja RR (Roundup Ready), resistente al glifosato. Es a partir de entonces, que se crea un nuevo paquete tecnológico de bajo costo e implementación, que se adoptó rápidamente, y que integra el cultivo de soja RR, un uso exhaustivo de glifosato y la siembra directa (Oyhantçabal & Narbondo, 2008). La dependencia de este paquete tecnológico, con un manejo simplificado de malezas en el cultivo de soja RR con base en la utilización de glifosato, logró bajar los costos de producción, convirtiéndose en un cultivo muy rentable (Salas & Sarubbi, 2013). Pero esta herramienta única e insustituible para el control de malezas, duró un tiempo y luego se dio un cambio en la composición de los enmalezamientos, con aparición de malezas con mayor adaptación al nuevo sistema agrícola, con tolerancia y algunas veces resistencia al glifosato (Fernández et al., 2013). La resistencia a un herbicida está generalmente asociada con una alta presión de selección, como resultado natural y predecible. La misma es favorecida por el uso repetido de herbicidas con el mismo modo de acción, hasta tal punto, que la población ya no es controlada por el herbicida, en las dosis indicadas (Heap, 1993-2023). Papa y Tuesca (2014) señalan que la presión de selección no solo se determina por la dosis de glifosato utilizada sino también, por su manejo, baja rotación de principios activos y la falta de integración con otros métodos de control no químicos. En la misma línea, el Comité de Acción de Resistencia a Herbicidas (HRAC, 2020) señala que la mayoría de los herbicidas comercializados actualmente, han seleccionado malezas resistentes. Los resultados

quedan evidenciados en la actualidad por Heap (1993-2023), el cual reporta 522 casos de especies resistentes en el mundo, desarrollando resistencia en 21 de los 31 sitios de acción de herbicidas utilizados.

En la figura No. 1 se expresa el incremento de biotipos resistentes a los distintos modos de acción.

Figura 1

Incremento mundial de biotipos resistentes según sitio de acción



Nota. Adaptado de Heap (1993-2023).

En Uruguay, según Heap (1993-2023) mediante el filtro de datos por país, hay tres especies del género *Amaranthus* reportadas como resistentes al glifosato. Fernández et al. (2013), haciendo referencia al control de malezas con dicho herbicida, las especies que vienen presentando tolerancias incrementales y mayores problemas para su control en Uruguay son: *Conyza bonariensis*, *Conyza sumatriensis* y *Lolium multiflorum*. Los mismos autores señalan que, en soja, la generalización de los problemas de resistencia, llevó a un aumento del costo del cultivo dado al aumento y variedad de la aplicación de herbicidas, con la consecuente pérdida de herramientas para el control de estas malezas. Este aumento está explicado por la utilización de herbicidas complementarios al glifosato, y el control realizado en barbecho y durante el desarrollo del cultivo.

A modo de afrontar esta problemática, se han propuesto nuevas alternativas tales como la utilización de nuevos eventos transgénicos en soja, que permitan utilizar otros herbicidas además de glifosato, que, de hecho, han tomado mayor relevancia en los últimos años, evidenciado por las aprobaciones recientes realizadas por el Gabinete Nacional de Bioseguridad (ver tabla A1). Dentro de estos nuevos eventos aprobados, se encuentra el DAS 44406-6 y MON 87708 como una herramienta más para el control de malezas difíciles. Herramientas que imponen nuevos desafíos en la producción agrícola.

2.1.1 Tecnología Enlist

El objetivo de la inclusión de dicha tecnología en Uruguay, es mejorar el programa de control de malezas resistentes tales como *Amaranthus palmeri*, *Conyza bonariensis* y complejos de gramíneas, que desde hace ya un tiempo presentan dificultades, y que repercuten directamente en los rendimientos. En la post emergencia de soja, permite utilizar glifosato, 2,4-D sal colina y glufosinato de amonio. Según Camelo, estos herbicidas pueden utilizarse desde la siembra o preemergencia del cultivo hasta el último estadio vegetativo en el caso de glufosinato de amonio, y hasta el estadio R2 en el caso de 2,4-D (“La genética Don Mario”, 2021). El primer componente de la tecnología Enlist es el evento de soja denominado DAS 44406-6. De acuerdo a la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (SAGyP, 2013) dicho evento fue obtenido por una transformación mediada por *Agrobacterium tumefaciens* y que consta de 3 genes principales. El gen aad-12 que proviene de la bacteria del suelo *Deftia acidovorans*, el cual codifica para la proteína ariloxialcanoato dioxigenasa 12 (AAD-12), y es el que brinda la capacidad de degradar el 2,4-D en 2,4-diclorofenol (DCP) quedando inactivo como herbicida. Por otro lado, según este mismo autor, el gen pat se obtuvo mediante el aislamiento de la bacteria del suelo *Streptomyces viridochromogenes*, la cual codifica para la proteína fosfotricina-acetil transferasa (PAT) y confiere tolerancia al herbicida glufosinato de amonio, mediante la resistencia otorgada a los inhibidores de la enzima glutamato sintetasa. Por último, este autor también indica que el gen 2mepsps es proveniente del maíz, y expresa la enzima 5-enolpiruvil shikimato-3-fosfato sintasa (EPSPS), que mediante una mutación le confiere a la planta la capacidad de sobrevivir ante la aplicación de glifosato. De acuerdo con Vago, responsable comercial de Corteva Uruguay, el paquete tecnológico también incluye el herbicida Enlist con la tecnología Colex-D, que contiene 2,4-D sal colina (56,5% concentración de activo) con adyuvantes que le otorgan baja volatilidad y reducen la deriva física (“Tecnología para el control”, 2021). Dicho autor afirma como necesaria la utilización del mismo, debido a que podrían encontrarse cultivos sensibles cercanos a la zona de aplicación. Frene (2020) sostiene que el tercer componente de esta tecnología, se trata de recomendaciones de buenas prácticas de manejo, como lo son, la mezcla de herbicidas residuales de distintos modos de acción

(inhibidores de PPO, ALS, PII y división celular) en preemergencia, seguido de mezclas en la postemergencia que incluyen Enlist Colex-D con glufosinato de amonio o glifosato.

2.1.2 Tecnología Xtend y XtendFlex

Con el mismo propósito que la tecnología Enlist, surge el desarrollo de las tecnologías denominadas Xtend y XtendFlex para soja. Las mismas fueron autorizadas por el Gabinete Nacional de Bioseguridad en 2017, a la empresa solicitante Monsanto Uruguay S.A. Luego de la adquisición de dicha empresa por Bayer S.A en 2018 (“Soja XtendFlex vs Enlist E3”, 2021), se realizaron nuevas autorizaciones, las cuales fueron recientemente aprobadas en 2021. Según Carrera, haciendo referencia a la tecnología Xtend, apunta a que aún no hay lanzamiento de variedades comerciales con esta tecnología, ya que no se ha concluido debido a que en Argentina es un tema irresoluto, el cual afecta los planes de búsqueda de variedades, lanzamiento y comercialización en Uruguay (“Se autorizaron nuevos eventos”, 2020). La tecnología Xtend, mediante la combinación de eventos apilados MON 89788 x MON 87708, aporta resistencia a los herbicidas glifosato y dicamba, y la XtendFlex mediante los eventos MON 89788 x MON 87708 x A5547-127 lo hace para tres herbicidas, adicionando al anterior el glufosinato de amonio (“Soja XtendFlex vs Enlist E3”, 2021). El evento común MON 87708, expresa la enzima denominada dicamba mono-oxigenasa (DMO), proveniente de *Stenotrophomonas maltophilia*, una bacteria aerobia presente en ambientes acuáticos, suelo y plantas, responsable en otorgar la tolerancia al herbicida Dicamba (Comité de Articulación Institucional [CAI], 2020; Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria [SENASA], 2016).

La problemática asociada a estas tecnologías, es el conflicto generado por el uso de Dicamba en cultivos resistentes y el daño en cultivos sensibles cercanos a la zona de aplicación. Esta es una problemática muy difundida en Estados Unidos, donde en ciertos estados como Arkansas, Missouri y Tennessee, se sembró soja con la inclusión de la tecnología, aplicando formulaciones convencionales de Dicamba que resultaron en muchos reclamos y denuncias por daños a cultivos sensibles (“Conflicto entre vecinos”, 2016). En Uruguay, esto podría generar un enorme problema si no se tiene en consideración, en vista que, si bien no hay variedades disponibles en el mercado hasta el momento para la producción de soja Xtend y XtendFlex, son tecnologías que incluyen eventos ya aprobados, sin considerar previamente autorizar nuevas formulaciones de Dicamba que prometan disminuir el riesgo de daño a cultivos sensibles.

2.2 VOLATILIZACIÓN

Los herbicidas utilizados en la producción de cultivos, pueden sufrir procesos que determinan destinos fuera del objetivo de la aplicación. Uno de estos procesos es

la volatilización, la cual es definida como el pasaje de estado líquido a gaseoso de un compuesto evaporándose hacia la atmósfera (Cunha et al., 2010). La volatilización es una de las rutas del plaguicida después de que ha penetrado el suelo o la planta. Según Alfaro (2013), los productos químicos que se volatilizan rápidamente y pasan a fase de vapor, pueden ser arrastrados por el viento, contaminando el ambiente y alcanzando cultivos sensibles no objetivo.

Los procesos involucrados que afectan la volatilización desde el suelo, incluyen interacciones entre las características físico químicas del compuesto, el suelo, las condiciones ambientales y las prácticas de manejo (Bedos et al., 2002). Según Sawchik (1996), son aquellos herbicidas que presentan alta presión de vapor, baja adsorción por la materia orgánica y las arcillas, y baja solubilidad, los que tendrán una mayor tendencia a perderse por volatilización, dependiendo de factores tales como la humedad y textura del suelo, la incorporación o no del herbicida y la temperatura. Nash (1983) reporta la humedad del suelo como la variable más importante afectando la tasa de volatilización, seguida por la temperatura del aire.

2.2.1 Propiedades del suelo que afectan la volatilización

Una vez que los herbicidas entran en contacto con el suelo, la adsorción es el proceso que afecta mayoritariamente los posibles destinos de los herbicidas en el mismo (Ross & Lembi, 1980, como se cita en Sawchik, 1996). La adsorción se debe a la interacción entre los compuestos con las partículas coloidales, por lo cual las propiedades intrínsecas del suelo (textura, materia orgánica, pH), las características físico químicas del herbicida, temperatura y humedad, propiedades extrínsecas como la labranza, son algunos de los factores que influyen en el proceso de adsorción (Montoya, 2017). Este proceso puede ser expresado mediante los índices de adsorción, como el coeficiente de partición (K_d) y el coeficiente de adsorción del suelo (K_{oc}). Conforme a Scoyoc y Ahlrichs (1990), como se cita en Sawchik (1996), el K_d es la relación entre la concentración del herbicida que es adsorbido y la concentración que hay en la solución. Por lo tanto, a medida que el valor es más pequeño, aumenta la concentración del herbicida en la solución.

Por otro lado, el K_{oc} de cada herbicida, indica la tendencia del compuesto a ser adsorbido por el carbono orgánico. Cuanto menor sea dicho valor, menor tendencia tendrá el herbicida a ser retenido (Sawchik, 1996). Algunos herbicidas pueden unirse a través de enlaces iónicos al suelo; sin embargo, la mayoría de los herbicidas tienden a ser no iónicos. Los ácidos débiles como el 2,4-D y el Dicamba, pierden su ion H^+ y pasan de un estado no iónico a neto negativo, que no se adsorbe fácilmente, porque tienen la misma carga negativa que las partículas del suelo. Sin embargo, pequeñas cantidades pueden ser retenidas por la materia orgánica y los coloides del suelo cargados positivamente (como los óxidos de hierro y aluminio); y en este sentido, el

carbono orgánico del suelo se convierte en un factor importante para la unión por partición (Monaco et al., 2002). En este sentido, Alvarez-Benedi et al. (1999) en experimentos realizados, reportaron que los suelos con texturas más gruesas presentan mayores pérdidas por volatilización que aquellos de textura fina. Por lo tanto, podría asegurarse que las características del suelo, juegan un rol fundamental en la adsorción de los herbicidas, como lo son la textura del suelo, y el contenido de carbono orgánico.

Por otro lado, Alfaro (2013) señala que, si el compuesto ha sido adsorbido o mezclado con el suelo, la volatilización se vería reducida significativamente, debido a las fuerzas involucradas a la adsorción, y a su vez, la incorporación del herbicida determinaría una menor concentración del producto en la superficie del suelo, impidiendo el escape de vapor.

Por otra parte, varios autores manifiestan que la volatilización aumenta con el contenido de humedad del suelo (Bedos et al., 2002). Villalba et al. (2016) sobre la volatilidad de Clomazone, concluyeron, que las aplicaciones en suelo seco o levemente húmedo, y que no sean inmediatamente regados o afectados por lluvia, resultan en menores pérdidas del herbicida por volatilización. Así, como Cherif y Wortham (1997), comprobaron en estudios de laboratorio donde se evaluaba la influencia de la humedad del suelo, que el Lindano se volatilizó un 11% y 0.8%, en suelo húmedo y seco respectivamente, en un período de 26 días de evaluación. Dicha diferencia la otorgaron a una probable competencia generada entre el agua y las moléculas del plaguicida por los sitios de adsorción, o a que dichos sitios no sean alcanzables debido a la interposición de las películas de agua. Por otro lado, Carbonari et al. (2020) cuantificaron el potencial de volatilidad del Dicamba en aplicaciones independientes o en mezcla con glifosato sobre diferentes superficies, determinando que el Dicamba aplicado solo, tuvo el nivel más alto de volatilidad cuando se aplicó en suelo húmedo y el nivel más bajo de volatilidad en suelo seco y paja.

De acuerdo a Nash (1983) durante el día, la superficie del suelo se seca, y durante la noche, a medida que aumenta la humedad superficial, se da un pequeño aumento de la volatilidad. Asimismo, señala que, este aumento de la volatilización nocturna relacionado al contenido de agua, tuvo mayor efecto en herbicidas con menor presión de vapor. Spencer y Cliath (1973) indican que la magnitud del efecto estará relacionada con la tasa de evaporación del agua, la presión de vapor del plaguicida y la concentración del plaguicida en la solución del suelo. La concentración en la solución del suelo dependerá de las características de adsorción y de la solubilidad en agua del plaguicida.

2.2.2 Factores ambientales que afectan la volatilización

Conforme a Grass et al. (1994), todos los parámetros ambientales influyen en la volatilización desde el suelo, siendo la temperatura del ambiente, la humedad relativa

y la velocidad del viento, parámetros climáticos que, en conjunto, determinan los resultados en la tasa de volatilización de los herbicidas. De acuerdo a Montoya y Porfiri (s.f.), los herbicidas medianamente volátiles tienen gran correlación con las condiciones de temperatura y humedad del ambiente, y, por lo tanto, son los que están fuertemente vinculados a las condiciones meteorológicas, que determinarán en mayor o menor medida su difusión a partir de la superficie tratada. Por otro lado, afirman que, los herbicidas de baja volatilidad y los clasificados como altamente volátiles son independientes de las condiciones meteorológicas.

2.2.2.1 Temperatura

Según Que Hee y Sutherland (1974), uno de los factores ambientales primordiales sobre la volatilidad, es la temperatura. Este parámetro es un factor sustancial afectando la volatilización, ya que la presión de vapor del compuesto depende directamente de las condiciones de temperatura, aunque este efecto es bastante complejo, debido a que, en aplicaciones al suelo, se encuentra fuertemente vinculado a la sequedad del mismo, por la adsorción del herbicida a la matriz del suelo (Bedos et al., 2002).

Behrens y Lueschen (1979) sostienen que la incorporación de herbicidas hormonales como Dicamba en un programa de control de malezas en soja, permite el aumento de su uso durante los meses de verano, cuando las temperaturas alcanzan los máximos anuales. Esto determina que probablemente los daños en cultivos sensibles aumenten con el uso de herbicidas. Los mismos autores realizaron un estudio en cámaras cerradas, donde se evaluaba el daño en soja por volatilización de Dicamba. El daño aumentó con el incremento de la temperatura de 15°C a 30°C, siendo evidentes los síntomas de daño en dos experimentos en los que la temperatura máxima no superó los 21°C, pero no se observaron mayores lesiones con el incremento de la temperatura a 40°C, lo cual atribuyeron a una probable reducción de la absorción de vapores, por el cierre estomático de las plantas. Mueller y Steckel (2019) obtienen conclusiones similares con respecto al rango de temperatura, observando menores lesiones por debajo de 15°C, y añaden que la volatilidad de dicamba aumentó en los tratamientos que adicionaron glifosato, probablemente explicado por el descenso del pH de la solución. Por otro lado, Ouse et al. (2018), en una investigación donde cuantificaban la volatilidad de herbicidas, determinaron un aumento de vapores en muestras de aire de 2,4-D dimetilamina y colina, con el incremento de la temperatura de 30°C a 40°C, aunque siendo varias veces más baja la volatilidad generada por 2,4-D sal colina. De Esteban et al. (2018) encontraron a partir de un experimento sobre distintas formulaciones de 2,4-D y otros herbicidas auxínicos en el control de *Amaranthus hybridus*, que el mejor control realizado sobre la maleza, fue por parte de las formulaciones 2,4-D ácido y sal colina, lo cual atribuyen a la pérdida de eficacia de los ésteres, debido a la volatilización que presentan al ser aplicados con altas temperaturas.

Hartzler (2017a) menciona un umbral de 29,4°C, como la temperatura en la cual debe tenerse mayor precaución al aplicar Dicamba en cercanías a cultivos sensibles, por el aumento en la potencialidad o riesgo de volatilizar.

2.2.2.2 Humedad relativa

La humedad relativa (HR) es el segundo factor ambiental más importante, que influye en el proceso de volatilización. Es de importancia resaltar que, dicho parámetro varía su efecto en la volatilización, dependiendo de la superficie a la cual se realiza la aplicación. Behrens y Lueschen (1979) en estudios en cámaras de crecimiento, comprobaron que los daños en soja generados por volatilización de Dicamba aplicado en maíz, fueron reducidos bajando la temperatura o aumentando la HR. Con respecto a este último, los mayores daños reportados fueron en condiciones de HR entre 70-75% con respecto a condiciones de 85-95%, lo cual podría explicarse por un aumento en la hidratación de la cutícula, perjudicando la absorción y translocación del herbicida. Por otro lado, Grass et al. (1994) también midieron la influencia de la HR del ambiente en la volatilización de trifluralina pero desde el suelo. En este caso, a HR de 31%, 41% y 78%, el porcentaje de trifluralina volatilizado durante las primeras 24 horas fue de 66%, 64% y 96% respectivamente, a una temperatura de 20°C y velocidad del viento entre 1.0-1.2 m/s. Por su parte, Davie Martin et al. (2015) comprobaron mediante mediciones de plaguicidas semivolátiles en el laboratorio, que la volatilización desde el suelo, aumentaba con el incremento de la HR, lo cual atribuyeron a que las moléculas de agua del aire, desplazan competitivamente mediante enlaces de hidrógeno a las moléculas de plaguicidas unidas mediante adsorción a las partículas del suelo. Por lo tanto, el aumento de la HR determina que la adsorción de los plaguicidas al suelo sea menor, generando consecuentemente un aumento en la tasa de volatilización.

2.2.2.3 Velocidad del viento

El aumento en la velocidad del viento, también es un factor que afecta el posible daño por volatilización de los herbicidas desde la superficie del suelo, debido a su efecto sobre el movimiento por difusión. Es decir que, una vez que los activos pasan a fase de vapor, el viento, es el causante del movimiento de esos gases volatilizados (*Manteniendo los herbicidas*, 2022). Según Waymann y Rüdell (1995), como se cita en Bedos et al. (2002), para velocidades del viento que acrecientan de 0,4 a 1,7 m/s, la volatilización de lindano desde el suelo, aumenta del 12 al 31% respectivamente, de la dosis de aplicación. Por su parte, Mondino (2020) indica que el 2,4-D éster en presencia de altas temperaturas pasa fácilmente al estado gaseoso y los vapores generados pueden ser arrastrados hasta distancias de 10 km o más de la zona aplicada, mediante corrientes de aire.

2.3 PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DE LOS HERBICIDAS QUE DETERMINAN LA VOLATILIZACIÓN

Las características físico químicas del compuesto, juegan un rol fundamental en el proceso de volatilización, destacando la presión de vapor y la solubilidad, como las variables más importantes y determinantes en la potencialidad o riesgo de volatilizar. Es importante conocer las características del compuesto al momento de realizar una planificación, ya que determinarán en gran medida el comportamiento del herbicida luego de realizada la aplicación.

2.3.1 Presión de vapor

La presión de vapor es la presión a la cual un líquido y su vapor, están en equilibrio a una determinada temperatura (“Presión de vapor”, 2014). La presión de vapor de un herbicida determina su volatilidad, siendo los herbicidas que se disipan más rápidamente, aquellos que poseen alta presión de vapor. Puede expresarse en pascuales (Pa), milímetros de mercurio (mm Hg), atmósferas (atm), entre otras. Según Gómez (2020), un herbicida con una presión de vapor menor a $1,0 \times 10^{-8}$ mmHg, presenta bajo potencial para volatilizarse, siendo mayormente retenido en el suelo y soluble en agua. Por su parte, Monaco et al. (2002) añaden que cuando la presión de vapor medida a 25°C es superior a $1,0 \times 10^{-4}$ mmHg, el herbicida tiene mayor potencial para volatilizarse, por lo cual debe tenerse mayor precaución al ser aplicado. En un estudio realizado por Nash (1983), sobre las tasas de volatilización de varios plaguicidas a partir del suelo, determinó que los compuestos caracterizados por presentar mayor presión de vapor, poseían mayores tasas de volatilización en las primeras horas post aplicación, contrariamente con aquellos que presentaban presiones de vapor más bajas, los cuales manifestaron una tasa de volatilización menor luego de la aplicación, disminuyendo lentamente. Sin embargo, los cambios post aplicación en las tasas de volatilización fueron similares, reduciéndose a la mitad luego de transcurridas las primeras 8 horas.

Montoya y Porfiri (s.f.) realizaron una clasificación de herbicidas según su volatilidad, tomando en cuenta la presión de vapor y si son aplicados al suelo o al follaje (tabla No. 1).

Tabla 1

Clasificación de herbicidas por su presión de vapor y aplicación

	Presión de vapor (mm Hg)	
	Aplicación al suelo	Aplicación al follaje
Volátiles	$> 10^{-4}$	$> 10^{-6}$
Medianamente volátiles	$10^{-4} - 10^{-6}$	$10^{-6} - 10^{-8}$
Baja volatilidad	$< 10^{-6}$	$< 10^{-8}$

Nota. Tomado de Montoya y Porfiri (s.f.).

La volatilización de los compuestos se ve afectada por la superficie donde se aplica, siendo las pérdidas por volatilización desde el suelo menores en comparación a las del follaje. Por lo tanto, las aplicaciones en post emergencia del cultivo, resultan en un mayor riesgo por volatilización, debido a que el herbicida es interceptado mayormente por la superficie del cultivo y no del suelo (Burnside & Lavy, 1966, Spencer et al., 1973, como se cita en Behrens y Lueschen, 1979). De tal forma, Waymann y Rüdell (1995), como se cita en Bedos et al. (2002), adjudican estas diferencias a la turbulencia generada sobre y dentro de las hojas, aumentando el intercambio gaseoso con el aire; asimismo manifestaron que, las interacciones entre el compuesto aplicado y el suelo o follaje son diferentes, señalando que el suelo presenta una adsorción mucho mayor, y a su vez, que la temperatura y humedad pueden ser diferentes entre los dos compartimentos, lo cual influye en el movimiento en la fase gaseosa.

La volatilidad de un compuesto desde el suelo húmedo puede medirse a través de la ley o constante de Henry (H), utilizando la presión de vapor, la solubilidad y el peso molecular, la cual puede expresarse en atm m³/mol.

$$H = PV * PM/S$$

Donde: H: Ley o constante de Henry (atm m³/mol); PV: Presión de vapor (atm); PM: Peso molecular (g.mol); S: Solubilidad (g.m⁻³).

De acuerdo con Aparicio et al. (2015), un alto valor de H denota que el plaguicida tiene alto potencial de volatilización desde el suelo hacia la atmósfera, dada la alta presión de vapor en relación a la baja solubilidad.

Gómez (2020) clasifica los plaguicidas según los valores de la constante H (tabla No. 2).

Tabla 2*Volatilidad del plaguicida según constante de Henry*

	Constante de Henry (atm m ³ /mol)
No volátil	< 3 x 10 ⁻²
Baja volatilidad	3 x 10 ⁻² a 1
Volatilidad moderada	1 a 101,3
Alta volatilidad	> 101,3

Nota. Adaptado de Gómez (2020).

2.3.2 Solubilidad

La solubilidad de un herbicida se define como la máxima concentración que puede disolverse del producto en un litro de agua a una temperatura determinada. Las unidades producto de la concentración, pueden expresarse en mg por litro (mg/L) (Anzalone, 2007). Según Alfaro (2013) cuando un herbicida tiene alta solubilidad en agua, presenta menor afinidad con las partículas del suelo, determinando que su dinámica esté asociada al transporte con el agua, en relación al sitio en el cual fue aplicado. Lo contrario sucede con herbicidas de baja solubilidad, los cuales tienden a acumularse en el suelo, siendo afectado por el contenido de humedad. Dicho de otra manera, un herbicida que es altamente soluble en agua tenderá a permanecer en el agua del suelo, mientras que un herbicida que tiene menor solubilidad intentará escapar del agua del suelo (Monaco et al., 2002). En este sentido, cuanto más seco se encuentre el suelo, mayores son las fuerzas de adsorción, y, por lo tanto, la volatilización del herbicida se ve disminuida. De acuerdo a Otto et al. (2001), como se cita en Anzalone (2007), la solubilidad en agua está condicionada por factores como el pH, la capacidad de disociación y la temperatura. Con respecto al último factor mencionado, en gran parte de los casos, la solubilidad de una molécula es directamente proporcional al aumento de la temperatura, pero en la mayoría de los herbicidas esta propiedad no se modifica dentro de un rango de 10 a 30°C.

En cuanto al pH, la solubilidad en agua se ve afectada por la variación de dicho factor, especialmente en herbicidas ácidos débiles como los hormonales (Anzalone, 2007). Los ácidos débiles pierden sus protones con menor rapidez, los cuales liberan sus protones unidos con más fuerza sólo en soluciones más alcalinas que los ácidos fuertes, resultando en una muy baja adsorción en suelos neutros y alcalinos (Montoya, 2017).

2.4 HERBICIDAS UTILIZADOS

2.4.1 2,4-D y sus formulaciones

El 2,4-D, perteneciente al grupo químico ácido fenoxiacético, es un herbicida hormonal selectivo sistémico, el cual inhibe el crecimiento en post emergencia de las malezas de hoja ancha, actuando como una auxina sintética que interviene en el metabolismo de los ácidos nucleicos (Instituto Regional de Estudios de Sustancias Tóxicas [IRET], s.f.a). Según Qurratu y Reehan (2016), el ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) y sus derivados, es uno de los herbicidas más utilizados del mundo. De acuerdo a Charles et al. (2001), de las diferentes formas de 2,4-D la sal de dimetilamina (DMA) y el éster 2-etilhexílico (EHE) representan aproximadamente entre el 90-95% del uso mundial de 2,4-D, siendo la minoría, formulaciones encapsuladas del 2,4-D ácido. En la tabla No. 3, se presentan las características de las distintas formas de 2,4-D, las cuales determinan en gran medida su capacidad de volatilización. La forma ácida, la sal dimetilamina y colina son las utilizadas en los experimentos.

Tabla 3

2,4-D, formas asociadas, y características que influyen en la volatilización

2,4-D y formas asociadas	Peso molecular (g/mol)	Presión de vapor (mmHg a 25°C)	Solubilidad (mg/L)	Potencial para volatilizarse	
ÁCIDA	221	$1,4 \times 10^{-7}$	44,558	Bajo	
SALES	Dimetilamina	266,13	$1,0 \times 10^{-7}$	729,397	Bajo
	Sódica	270,15	Se disocia a ácido	45000	Bajo
	Colina	324,7	Se disocia a ácido	768,0	Bajo
ÉSTER	Butírico	277,16	$3,97 \times 10^{-4}$	46	Alto
	Etilhexil	333,27	$3,6 \times 10^{-6}$	0,0867	Moderado

Nota. Elaborado con base en Gervais et al. (2008), Peterson et al. (2016), Montoya y Porfiri (s.f.).

La formulación de 2,4-D puede afectar significativamente el potencial de volatilidad. Varios autores como Dexter (1993) y Qurratu y Reehan (2016), afirman que los ésteres de 2,4-D (especialmente butírico), pueden producir vapores dañinos, mientras que las formulaciones de sales son esencialmente no volátiles. Esto se debe fundamentalmente a la presión de vapor de los ésteres, superior a $1,0 \times 10^{-4}$ mmHg a 25°C (Monaco et al., 2002), y a su baja solubilidad, que los hace más propensos a perderse por volatilización. Las sales de amina de 2,4-D generalmente se consideran

no volátiles dado el bajo valor de la constante H. La sal DMA, por ejemplo, presenta una constante H de $1,4 \times 10^{-16}$ atm m³/mol (Gervais et al., 2008), muy por debajo del valor clasificado como no volátil de la categorización realizada por Gómez (2020), dada su baja presión de vapor y moderada solubilidad. Por su parte, Mondino (2020) agrega, que, si bien las formulaciones de amina tienen baja volatilidad, las condiciones inadecuadas de aplicación pueden volverlas volátiles y causar daños en cultivos sensibles. Con respecto al 2,4-D sal colina, el cual es indicado para su utilización como parte de la tecnología Enlist, por su menor probabilidad de volatilizar en relación a otras formulaciones, Sosnoskie et al. (2015) determinaron en una investigación, que definitivamente la sal colina presenta menor probabilidad de producción de vapores dañinos, en relación a las formulaciones éster, y, además, que posiblemente no sea más dañina que las formulaciones amina.

2.4.2 Dicamba

El Dicamba es un herbicida post emergente sistémico y selectivo, regulador del crecimiento, utilizado para el control de malezas anuales de hoja ancha. El mismo es absorbido por hojas y raíces y translocado en la planta actuando en el transporte de ácido indolacético (hormona vegetal auxina). Pertenece al grupo químico ácido benzoico (IRET, s.f.b).

Ha sido utilizado durante mucho tiempo en cultivos gramíneos como trigo, cebada, maíz, sorgo, y recientemente permite la aplicación en post emergencia de soja, lo que proporciona otra herramienta para el control de malezas (Productiva Comunicación & Marketing, 2022). Según Bunch et al. (2012), puede ser formulado a partir del ácido original, reemplazando el ión hidrógeno por otro catión cargado positivamente, obteniendo otras formulaciones como la sal dimetilamina (DMA), sal de sodio, sal de diglicoamina (DGA), sales de isopropilamina (IPA) y sal de potasio. En la tabla No. 4, se presentan las características relacionadas a la volatilización de la formulación con sal dimetilamina de Dicamba, la cual es ampliamente usada y corresponde a la utilizada en los experimentos.

Tabla 4

Propiedades que influyen en la volatilización del ácido y sal dimetilamina de Dicamba

Forma de Dicamba	Peso molecular (g/mol)	Presión de vapor a 25°C (mmHg)	Solubilidad en agua (mg/L)	Potencial para volatilizarse
Ácido dicamba	221,04	$3,4 \times 10^{-5}$	4500	Alto
Sal dimetilamina	266,12	Se disocia a ácido	720,000	Moderado

Nota. Adaptado de Bunch et al. (2012).

Dicamba presenta como característica su alta presión de vapor, lo que aumenta su potencial para volatilizarse. Esto podría generar mayor posibilidad de daño por volatilización hacia cultivos sensibles luego de una aplicación, en comparación al 2,4-D. El ácido de Dicamba es la forma de la molécula que puede volatilizarse luego de una aplicación (Hartzler, 2017b). En una investigación realizada por Behrens y Lueschen (1979), obtuvieron mayor tasa de volatilización de Dicamba como ácido no formulado en comparación a las sales comerciales de Dicamba, y a su vez, la sal DMA provocó mayores daños en soja que otras sales, como la de sodio, potasio, litio, dietanolamina y trietanolamina. La sal DMA puede volatilizarse durante o después de la aplicación, mediante la formación de la forma ácida del herbicida. Esto se relaciona con las demostraciones realizadas por Sall et al. (2020), donde evidencian que las condiciones meteorológicas u otras variables como las características del suelo, presentan gran influencia al momento de evaluar la volatilidad del compuesto aplicado, manifestando que ningún parámetro único exhibe una correlación con la pérdida de Dicamba por volatilización. Los mismos autores cuantificaron la volatilidad de sales de Dicamba en condiciones de campo, observando en todos los casos niveles bajos de volatilidad, pero con valores máximos de vapor dentro de las primeras 24 horas post aplicación, disminuyendo a niveles mucho más bajos al día 3 post aplicación.

2.5 SÍNTOMAS DE DAÑO POR 2,4-D Y DICAMBA EN SOJA SUSCEPTIBLE

Los herbicidas conocidos como auxinas sintéticas, interrumpen el crecimiento de la planta, actuando en la división, diferenciación y elongación de las células vegetales (Venkov et al., 2000, como se cita en Qurratu y Reehan, 2016). Según Qurratu y Reehan (2016) los síntomas de daño por 2,4-D pueden manifestarse como torsiones en el tallo y pecíolo, deformaciones en las hojas y disminución del tamaño y crecimiento de las raíces. De Esteban y Sansot (2017) señalan como característica distintiva de daños causados en soja por 2,4-D de otros herbicidas hormonales, el aspecto que toman las hojas a modo de “cuero de sapo”, y a su vez, distinguen las lesiones causadas por Dicamba en hojas jóvenes, las cuales pueden presentarse deformadas y curvadas con aspecto de “cucharita”. El daño observado por Dicamba, depende mucho de las condiciones del suelo y clima durante y después de la exposición al herbicida. Además, la sensibilidad de la soja, depende del estado fenológico en el momento de la exposición, siendo más susceptible en la etapa reproductiva (especialmente R1), que en la etapa vegetativa (Griffin et al., 2013). En este sentido, Cuvaca et al. (2021) determinaron en un estudio, que se requirieron dosis de 2,4-D, de 25.9, 24.0 y 27.7 g i.a por hectárea, para causar 5% de síntomas de daño en soja evaluados a los 21 días post aplicación, en las etapas V2, R1 y R2 respectivamente. Sugiriendo que estas pequeñas dosis, evidentemente pueden generar daño, y en el estado R1 la susceptibilidad es mayor que en V2 y R2. En referencia al tiempo de exposición,

Behrens y Lueschen (1979) detectaron daños en soja por Dicamba, durante 3 días luego de la aplicación en maíz, incrementándose rápidamente con el aumento del tiempo de exposición hasta las 4 horas. Extendiendo el tiempo de exposición a 24 horas, con una temperatura de 30°C y la aplicación de 0,28 kg/ha de la sal DMA de Dicamba, no causó más aumentos significativos. Sin embargo, Ouse et al. (2018) determinaron mediante experimentos a cámara cerrada donde se capturaron los vapores generados de 2,4-D y Dicamba a las 24, 48, 72 y 96 horas luego de la aplicación en maíz, que para ambos herbicidas se cuantifican vapores dañinos, incluso 96 horas luego de la aplicación, por lo cual sugieren como importante, evaluar la volatilización de dichos herbicidas auxínicos durante un período mayor.

En relación a la distancia desde la zona de aplicación, Sosnoskie et al. (2015) en un estudio sobre la volatilidad de tres formulaciones de 2,4-D aplicadas en bloques cuadrados individuales (750 m²) y el efecto en el cultivo de algodón, comprobaron que el mayor daño fue en respuesta al 2,4-D éster (exposición de 0 a 48 h) siendo de 63, 57, 48, 29, 13 y 2% a distancias de 1,5, 3, 6, 12, 24 y 48 m desde el borde del bloque de tratamiento, respectivamente. Con la excepción de la distancia 1,5 m y 3 m, el daño relacionado con al 2,4-D éster, disminuyó significativamente con el aumento de la distancia desde la parcela tratada. Además, detectaron menos del 5% de la estimación visual máxima de daño con la formulación de amina (exposición de 0 a 48 h), y solo a distancias de 1,5 y 3 m del área tratada. No vieron lesiones para la formulación con sal colina, excepto a la distancia de 1,5 m de la parcela tratada.

2.6 HIPÓTESIS BIOLÓGICA

A partir de la información recabada, se plantea como hipótesis, que la aplicación de los herbicidas 2,4-D y Dicamba en soja que incluyan los eventos DAS 44406-6 y MON 87708, pueden generar daño a cultivos de soja convencionales. El nivel de daño dependerá de la formulación utilizada, las condiciones de humedad del suelo y la temperatura ambiental en el momento y posterior a la aplicación y la distancia entre la zona de aplicación y cultivos de soja sensible.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN

Los experimentos fueron realizados en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni (EEMAC, Facultad de Agronomía - Paysandú), durante el período de octubre del 2020 a diciembre del 2021. Dos de los experimentos se realizaron bajo condiciones controladas de temperatura y fotoperiodo, en la cámara de crecimiento del laboratorio de Malherbología. El tercer experimento fue realizado a campo, en el potrero 6A de dicha Estación.

Para la realización de los tres experimentos, se utilizó soja como especie bioindicadora. La variedad fue DM 60i61 IPRO, susceptible a los herbicidas 2,4-D y Dicamba.

3.2 EXPERIMENTO 1

3.2.1 Diseño experimental y Tratamientos

El diseño experimental utilizado fue Diseño Completo al Azar, con arreglo factorial de tratamientos. Siendo los factores de estudio, cuatro herbicidas, tres temperaturas (15, 25 y 35°C) y dos condiciones de humedad del suelo (húmedo y seco), con cinco repeticiones más un tratamiento testigo.

Los herbicidas utilizados en los tratamientos fueron distintas formulaciones de 2,4-D, y el herbicida Dicamba. El equivalente ácido (ea) de las tres formulaciones de 2,4-D fue de 900 g ea/ha y en Dicamba 580 g ea/ha.

Tabla 5

Descripción de los tratamientos evaluados

Formulación	Producto comercial	Tipo de formulación	Ingrediente activo	Equivalente ácido (g/L)
1	Enlist	Concentrado soluble	Sal Colina del ácido 2,4-D	456
2	Dedalo Elite	Microemulsión	2,4-D ácido	300
3	2,4-D Amina	Concentrado soluble	Sal de 2,4-D dimetilamina	480
4	Banvel	Concentrado soluble	Dicamba sal dimetilamina	480

3.2.2 Metodología del experimento

Para la siembra de soja, se utilizaron macetas plásticas descartables de 600 cm³, las cuales fueron sembradas con cinco semillas por maceta. Las mismas se mantuvieron en el invernáculo, sin restricciones hídricas. Se ralearon las plántulas dejando tres por maceta. En el estado V3-V4 se trasladaron a la cámara de crecimiento, en la temperatura correspondiente y para la aplicación de los tratamientos herbicidas.

Para la aplicación de los tratamientos, las macetas fueron colocadas individualmente en bolsas de polietileno; y se le colocó un recipiente plástico al centro con tierra, a los que se le aplicó los tratamientos herbicidas en cantidad correspondiente a las dosis mencionadas para cada herbicida, y para la superficie del recipiente. Esto multiplicado para cada condición de humedad del suelo.

Posteriormente, las bolsas de polietileno fueron selladas a fin de evitar pérdidas y contaminación dentro de la cámara y se mantuvieron dentro por 24 horas.

En la figura No. 2 puede apreciarse las macetas preparadas con el recipiente (amarillo) conteniendo el herbicida, inmediatamente después de la aplicación.

Figura 2

A la izquierda, macetas inmediatamente después de la aplicación y sellado; a la derecha, disposición de los tratamientos en la cámara



Transcurridas las primeras 12 horas, se realizaron evaluaciones visuales de fitotoxicidad sin quitar las bolsas, tomando como referencia una escala visual de 0 a 10 respecto al testigo, donde 0, correspondió a ningún síntoma de daño, y 10 a una planta muerta.

A las 24 horas, las macetas se retiraron y se procedió a quitarles la bolsa de polietileno y el recipiente que contenía la tierra con el tratamiento herbicida, realizando nuevamente la observación y el registro de daño, con posterior traslado al invernáculo, donde continuaron su crecimiento.

Las siguientes observaciones se realizaron a las 48 horas, 5 y 10 días post exposición de las plantas a los tratamientos. Finalizado el proceso de evaluación, se procedió al corte de las plantas de cada maceta y se registró el peso fresco de cada unidad.

3.2.3 Análisis estadístico

Los resultados de daño, asignados por los síntomas observados, fueron analizados a través de modelo lineal generalizado, para variable binomial. Donde se definió como éxito el hecho de que el daño superara cierto umbral. En el caso de las evaluaciones de las 48 horas, 5 y 10 días post aplicación, el umbral de corte fue daño $>$ a 0,2, ya que, por debajo de dicho valor, se consideró insignificante la expresión de fitotoxicidad. El tipo de respuesta a la temperatura lineal o cuadrática para la condición de humedad y para cada tipo de formulación, se estudiaron con contrastes de tendencia. Para los análisis se usó el paquete estadístico GLINMIX del SAS.

3.3 EXPERIMENTO 2

3.3.1 Diseño experimental y Tratamientos

El experimento fue conducido en un diseño Completo al Azar, con cinco repeticiones. Los tratamientos fueron dispuestos en un arreglo factorial, siendo los factores, los herbicidas, diferentes períodos de exposición a la volatilización y las condiciones de humedad del suelo al momento de la aplicación (suelo seco y suelo húmedo).

Los herbicidas utilizados, fueron los mismos que en el experimento 1 (tabla No. 5), utilizando igual dosis.

Los períodos de exposición de las plantas a los tratamientos herbicidas fueron P1:0 a 24 horas, P2: 0 a 1 hora, P3: 1 a 3 horas, P4: 3 a 12 horas, P5: 12 a 24 horas post aplicación.

3.3.2 Metodología del experimento

La metodología para llevar a cabo el experimento, se realizó de igual forma que el experimento 1, en lo que respecta a la etapa de preparación de las macetas, la siembra y el raleo de las plantas, así como también, el período de crecimiento en el invernáculo. El experimento se instaló cuando la soja se encontraba en el estadio V4.

La aplicación y forma de evaluación fue igual a la comentada en el experimento 1, el tiempo de exposición correspondió al tiempo en el que el recipiente conteniendo el herbicida era mantenido junto a las plantas en las bolsas de polietileno cerradas y en la cámara de crecimiento. La temperatura a la que fue evaluado este experimento fue 35°C.

Transcurrida la primera hora, se retiraron de la cámara los tratamientos correspondientes a ese periodo de exposición, y en ese momento se prepararon los P3 para ingresarlos a la cámara. De la misma forma se procedió con P4 y P5, los cuales ingresaron a la cámara, exponiéndose a los tratamientos de las 3 a 12 y 12 a 24 horas post aplicación, respectivamente.

Luego de retirarse de la cámara los tratamientos fueron llevados al invernáculo para continuar su crecimiento.

La visualización de daños se realizó a las 12, 24 y 48 horas post aplicación, y, 5 y 10 días posteriores.

3.3.3 Análisis estadístico

Los resultados de daño, asignados por los síntomas observados fueron analizados a través de modelo lineal generalizado, para variable binomial. Donde se definió como éxito el hecho, que el daño superara cierto umbral. En el caso de las evaluaciones de las 24 y 48 horas post aplicación, el umbral de corte fue daño $>$ a 0,1, debido a que hubo suficientes registros de daño a partir del umbral mencionado. Mientras que en la evaluación de los 10 días post aplicación, considerando que el nivel de daño era mayor, se le asignó el valor de éxito a daño $>$ a 0,2. Cabe destacar, que, en este último, la dispersión en los niveles de daño, por encima de dicho valor, fue mayor que en las demás evaluaciones. Para los análisis se usó el paquete estadístico GLINMIX del SAS.

3.4 EXPERIMENTO 3

3.4.1 Diseño experimental y Tratamientos

El diseño experimental fue Completo al Azar, con arreglo factorial de tratamientos. Los factores fueron dos formulaciones de 2,4-D, tres distancias desde la zona aplicada (2, 10 y 20 m); cuatro posiciones cardinales (Norte, Sur, Este y Oeste) y cuatro tiempos de exposición al área aplicada (0 a 2, 2 a 6, 6 a 24 y 0 a 24 horas post aplicación). La unidad experimental fue la maceta que contenía 2 plantas y las repeticiones fueron 4.

Los herbicidas utilizados fueron dos formulaciones de 2,4-D (tabla No. 6). Las dosis utilizadas fueron 4 veces la dosis recomendada. En el caso de 2,4-D sal colina se usó 912 g ea/ha y en 2,4-D dimetilamina 960 g ea/ha.

Tabla 6

Descripción de las formulaciones utilizadas

Fomulación	Producto comercial	Tipo de formulación	Ingrediente activo	Dosis (g de equivalente ácido/ha)
1	Enlist	CS	Sal Colina del ácido 2,4-D	3648
2	2,4-D Amina	CS	Sal de 2,4-D dimetilamina	3840

Nota. *CS: Concentrado soluble

En la figura No. 3 puede distinguirse a modo orientativo, las áreas aproximadas donde se realizaron las aplicaciones de ambas formulaciones, distanciados entre sí para evitar contaminación entre las áreas experimentales.

Figura 3

Áreas donde se dispusieron los tratamientos correspondientes a la formulación 1 y 2 en el potrero 6A de la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni



3.4.2 Metodología del experimento

El potrero donde fue instalado el experimento, es plano con leve o nula pendiente perceptible y presentaba la vegetación con altura inferior a 10 cm, por tanto,

no había interferencia al desplazamiento de los herbicidas volatilizados. Se delimitaron dos áreas de 30 m² distanciadas entre sí (Figura No. 3), donde fueron realizadas las aplicaciones de cada formulación y marcadas las distancias a las que se expusieron las plantas bioindicadoras para la evaluación de daño por volatilización.

Anterior a la aplicación fueron sembradas cinco semillas de soja en macetas con capacidad de 250 cm³, las cuales contenían tierra sin aplicaciones de herbicidas. Luego se ralearon, dejando 2 plantas por maceta. Cuando llegaron al estadio de V3 se decidió la aplicación de los herbicidas.

La aplicación fue realizada con un equipo experimental presurizado a CO₂, y calibrado para un volumen de 120 L/ha, dotado de Boquillas TT11001, que erogaron gotas medianas. En la tabla No 7, se presentan las condiciones meteorológicas al momento de las aplicaciones, datos tomados de la estación meteorológica de la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni.

Tabla 7

Condiciones meteorológicas al momento de la aplicación

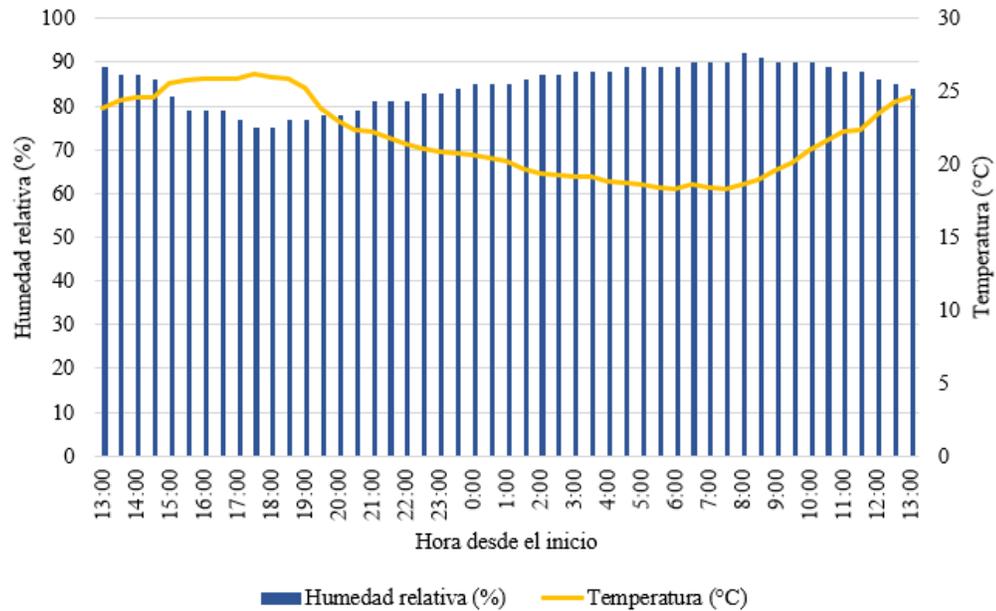
Hora de aplicación	13:00 pm
Hora de finalización	13:15 pm
Temperatura (°C)	23,9
Humedad relativa (%)	89
Velocidad del viento (km/h)	4,8
Dirección del viento	Sur-Sureste (SSE)
Precipitaciones (mm)	-

Nota. Adaptado de P. Choca (comunicación personal, 27 de setiembre, 2021).

En la figura No. 4, pueden apreciarse las condiciones de temperatura y humedad relativa en las siguientes 24 horas post aplicación.

Figura 4

Condiciones meteorológicas en las siguientes 24 horas post aplicación

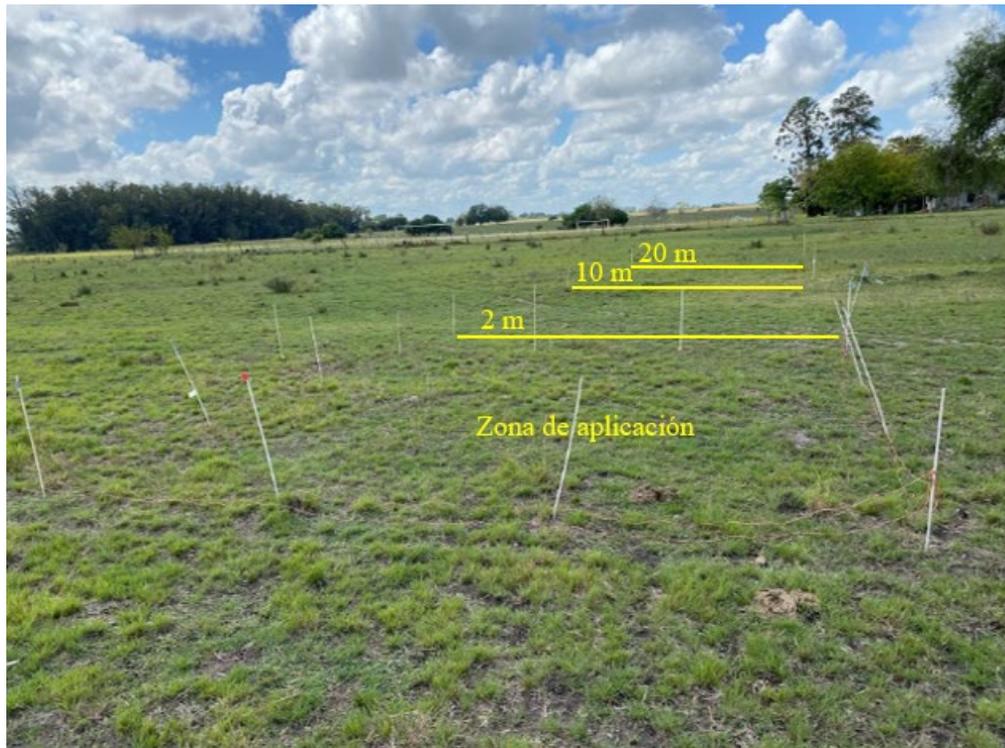


Una vez culminada la pulverización, se colocaron las macetas correspondientes a los periodos de exposición 0 a 24 horas y 0 a 2 horas, ubicando las macetas de manera aleatoria en cada punto cardinal y distancia de la zona tratada.

La figura No. 5 muestra la disposición de las varillas hacia el Este desde el centro de una de las áreas a tratar, en este caso, con la formulación 1 (2,4-D sal colina).

Figura 5

Ubicación de varillas que indican la distancia desde el área tratada, en la posición Este



En la figura No. 6 se observa a modo ilustrativo, el posicionamiento de las macetas luego de la aplicación.

Figura 6

Unidades experimentales colocadas luego de la aplicación



Transcurridas las 2 horas post aplicación se retiraron las macetas correspondientes al tiempo de exposición 0 a 2 horas, llevándolas al telado (quedando solo las correspondientes al período 0 a 24 hs) y se colocaron las macetas correspondientes al tiempo de exposición de 2 a 6 horas. Igual procedimiento se realizó para el tiempo de exposición de 6 a 24 horas. Cumplidas las 24 horas se retiraron la totalidad de macetas del campo.

La evaluación de daño se realizó en comparación a los testigos, utilizando el mismo criterio que en los experimentos 1 y 2. Se realizaron tres observaciones consecutivas, a las 48 horas, y a los 10 y 20 días post aplicación.

3.4.3 Análisis estadístico

Los resultados de daño, asignados por los síntomas observados fueron analizados a través de modelo lineal generalizado, para variable binomial. Donde se definió como éxito, el hecho de que el daño sobrepasa cierto umbral. En el caso de las evaluaciones de las 48 horas y 10 días post aplicación, el umbral de corte, fue daño $>$ a 0.2, ya que, por debajo de dicho valor, fueron mínimos los registros. Mientras que en la evaluación de los 21 días post aplicación, considerando que el nivel de daño era mayor, se le asignó el valor de éxito a daño $>$ a 2. Para los análisis se usó el paquete estadístico GLINMIX del SAS.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados de cada uno de los experimentos en forma separada. Para los tres experimentos se analizaron todas las interacciones, incluidas las triples, las que en ningún caso fueron significativas. Por ello, se retiraron del análisis, para mejorar el nivel de precisión de efectos principales e interacciones dobles.

Para los análisis, los niveles de daño fueron agrupados según la dispersión de los valores y para cada evaluación de daño y experimento. Los niveles fueron muy pequeños para los tres experimentos, lo cual podría explicarse por el estado fenológico de la soja, la cual se encontraba en estado vegetativo en los tres casos. Momento en el cual, la susceptibilidad a la exposición de los herbicidas es menor, respecto al estado reproductivo, y particularmente R1, donde varios autores afirman como el estadio de mayor susceptibilidad.

4.1 EXPERIMENTO 1

En la tabla No. 8, se presenta el análisis de varianza de los diferentes factores estudiados, en los resultados de daño > a 0,2 para las 12, 24 y 48 horas post aplicación, y > a 2 a los 10 días post aplicación y del peso fresco al final del experimento.

Tabla 8

Análisis de varianza para las evaluaciones de daño a las 12, 24, 48 horas y del daño y peso fresco a los 10 días post aplicación

Efecto	p- valor				
	12 HPA	24 HPA	48 HPA	10 DPA	PESO
Herbicida	1,0000	1,0000	0,9916	1,0000	0,7239
Humedad	1,0000	0,9930	0,9970	0,9855	0,0032
Temperatura	0,9994	0,9994	0,9997	0,9986	<0,0001
Herbicida x Humedad	0,3397	0,7339	0,8853	0,9999	0,4243
Herbicida x Temperatura	0,9916	1,0000	0,9287	1,0000	0,3539
Humedad x Temperatura	0,4666	0,0045	0,3564	0,9907	0,0194

Nota. Valores de p- valor <0,05 son significativamente diferentes.

La interacción humedad x temperatura resultó significativa en la expresión del daño en la evaluación de las 24 HPA y en el peso fresco al final del experimento. Las medias en porcentaje y el peso se presentan en las tablas No. 9 y 10.

Tabla 9

Medias de porcentaje de la población con daño superior a 0,2 a las 24 HPA

Humedad	Temperatura		
	15°C	25°C	35°C
Si	3,5E-5 Aa	0,2155 Aa	5,738E-7 Aa
No	0,0081 Aa	1,156 Aa	5,422E-6 Aa

Nota. Letras mayúsculas comparan temperatura dentro de cada condición de humedad; letras minúsculas comparan condición de humedad dentro de cada temperatura (Tukey $p < 0,05$)

Si bien el modelo determinó que la interacción humedad x temperatura era significativa, la separación de las medias no logró identificar diferencias entre el nivel de un factor dentro de otro. De todos modos, las condiciones a 25°C, determinaron mayor nivel de daño en comparación a los 15°C y 35°C. Estos resultados eran esperados, coincidiendo con Behrens y Lueschen (1979), los cuales reportan que el daño por volatilización, aumenta con el incremento de la temperatura de 15°C a 30°C, no encontrando mayores síntomas de daño, con el aumento de la temperatura a 40°C, debido a una probable reducción de la absorción de vapores, por el cierre estomático de las plantas.

Por otro lado, y en discordancia con la bibliografía, donde varios autores manifiestan que la volatilización aumenta con el contenido de humedad del suelo, hubo una tendencia en las tres temperaturas evaluadas, a mayor daño cuando la condición de suelo donde se aplicó, se mantuvo seco. Igualmente, hay que destacar que, todos los niveles de daño fueron muy bajos.

Si bien los herbicidas no determinaron niveles de daño diferentes significativamente, igualmente se presenta el daño de cada herbicida, a través de las frecuencias de cada tratamiento según nivel de daño, para la evaluación de los 5 DPA (tabla No. 10), ya que, a los 10 DPA el nivel de recuperación fue casi total.

Tabla 10

Porcentaje de plantas con cada nivel de daño, en la evaluación a los 5 DPA

Principio activo	Nivel de daño en la escala usada		
	0	0,1-0.2	>0.2
Testigo	100	0	0
2,4-D sal colina	100	0	0
2,4-D ácido (microemulsión)	80	13.3	6.6
2,4-D sal dimetilamina	93	6.6	0
Dicamba	90	10	0

El nivel de daño fue nulo para el caso del activo 2,4-D sal colina, coincidiendo con Sosnoskie et al. (2015), los cuales concluyeron a partir de una investigación, que el mismo presenta las menores probabilidades de producción de vapores dañinos por las características de la formulación, con respecto a otras formulaciones del mismo herbicida.

Por otro lado, el nivel de daño fue muy bajo para los demás herbicidas, aunque puede destacarse que en el nivel de 0,1-0,2, hubo leves diferencias, donde la microemulsión de 2,4-D y dicamba, presentaron algo más de daño en relación al 2,4-D dimetilamina. A su vez, la microemulsión de 2,4-D, fue la única que presentó daños en la escala mayor a 0,2. Esto indica que la volatilización va más allá del activo y destaca la importancia del tipo de formulado. El 2,4-D dimetilamina, generalmente se considera no volátil dado el bajo valor de la constante H ($1,4 \times 10^{-16}$ atm m³/mol) (Gervais et al., 2008) con respecto a los demás herbicidas.

El peso fresco de la interacción humedad y temperatura, indicó como se había comentado, el mayor daño cuando la temperatura fue de 25°C.

Tabla 11

Peso fresco de las unidades evaluadas

Humedad	Temperatura		
	15°C	25°C	35°C
Si	19,94 Aa	13,87 Ba	16,67 ABb
No	22,26 Aa	13,56 Ba	22,16 Aa

Nota. Letras mayúsculas comparan temperatura dentro de cada condición de humedad; letras minúsculas comparan humedad dentro de cada temperatura (Tukey $p < 0,05$)

Las condiciones de temperatura dentro de suelo húmedo, tuvieron mayor efecto a los 25°C, donde el peso se redujo un 17% con respecto a la evaluación de 35°C; y 30% con respecto a los 15°C. Este comportamiento parece estar relacionado a lo comentado anteriormente, sobre la disminución de daño por menor absorción de vapores.

Cuando se compara la condición de humedad dentro de temperatura, a los 35°C se vio mayor efecto, con una reducción del 25% en el peso cuando la aplicación fue en suelo húmedo, con respecto al seco. Pudiendo indicar que, la volatilización estuvo acelerada por el contenido de humedad del suelo, tal como lo comentan Cherif y Wortham (1997), los cuales adjudican dicha diferencia a una probable competencia generada entre el agua y las moléculas del plaguicida por los sitios de adsorción, o a que dichos sitios no sean alcanzables debido a la interposición de las películas de agua.

Y es concordante con la evaluación de daño en esa fecha, donde en esa temperatura y sin humedad, el 100% de la población no presentaba síntomas de daño

y con humedad, el 12% presentaba daño entre 0.1 y 0.2 y 4% presentaba daño identificado como superior a 0.2 en la escala utilizada (datos no presentados).

A los 15 y 25°C no hubo diferencias significativas en la condición de humedad dentro de temperatura, aunque a los 15°C hubo una leve tendencia a 11% en la reducción del peso en suelo húmedo con lo que respecta al seco.

4.2 EXPERIMENTO 2

La tabla No. 12, presenta el análisis de varianza de las medias de porcentaje de la población con daño superior a 0,1 en las evaluaciones de las 24 y 48 HPA, y > a 0.2 en la evaluación a los 10 DPA.

Tabla 12

Análisis de varianza de las medias del porcentaje de la población, con daño superior a 0,1 en la evaluación de las 24 y 48 horas y > a 0.2 en la evaluación a los 10 DPA

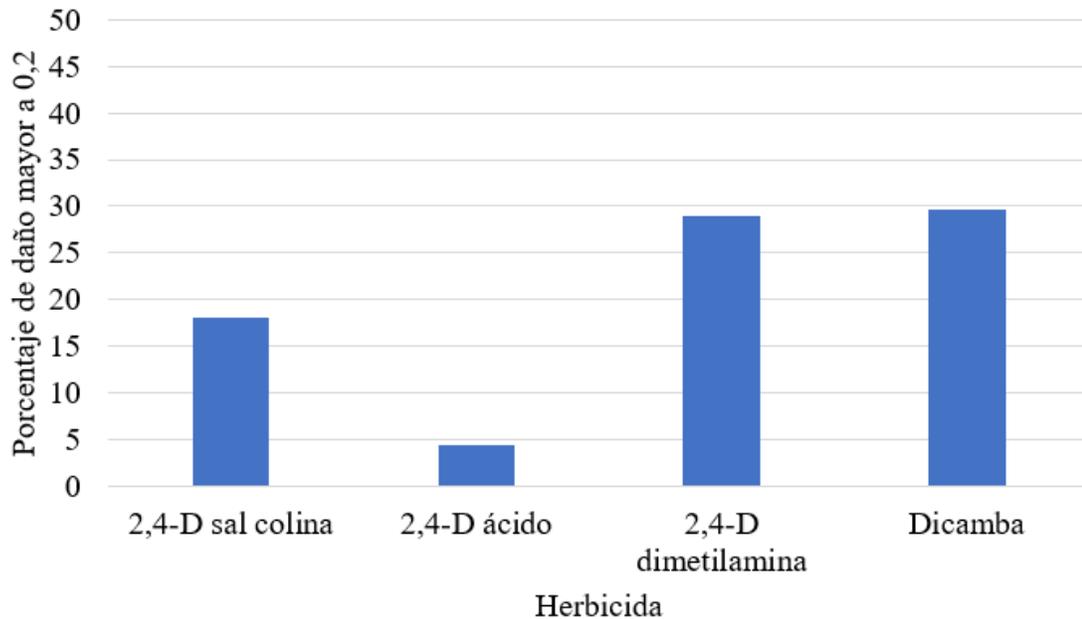
Efecto	p- valor		
	24 HPA	48 HPA	10 DPA
Herbicida	1,0000	1,0000	0,6436
Humedad	0,9740	0,9972	0,6882
Tiempo de exposición	1,0000	1,0000	0,8155
Herbicida x Humedad	0,9083	0,8250	0,1732
Herbicida x Exposición	0,9999	1,0000	0,4311
Humedad x Exposición	0,6247	1,0000	0,3837

Nota. Valores de p- valor <0,05 son significativamente diferentes.

En el experimento, no se encontraron diferencias significativas para ninguno de los efectos principales o sus interacciones. Aun cuando no se encontró significancia estadística para los efectos de herbicida, condición de humedad de suelo y tiempo de exposición, se presentan los promedios de porcentaje de la población con daño superior a 0.2 en la última evaluación (10 DPA) para cada efecto principal.

Figura 7

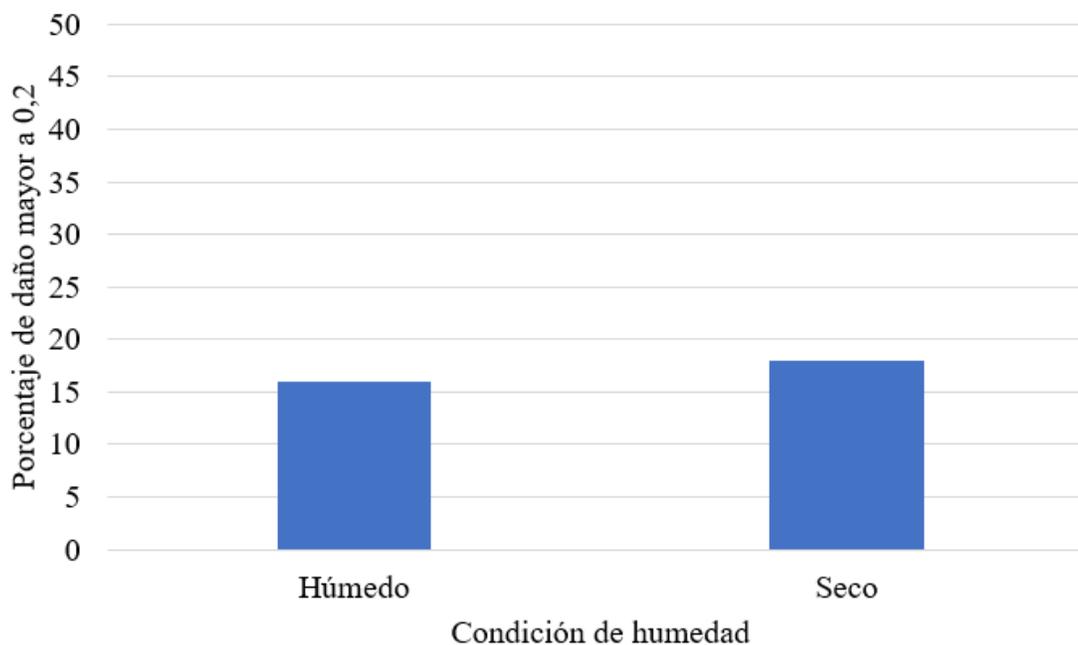
Porcentaje de la población con daño superior a 0.2 para cada herbicida en la evaluación de los 10 DPA



El mayor porcentaje de la población con daño superior a 0.2 fue para los tratamientos con dicamba y 2,4-D dimetilamina. Por un lado, esto parece ser congruente con la bibliografía, ya que ambos presentaron prácticamente el doble de daño por volatilización con respecto a 2,4-D sal colina. A su vez, como indica Mondino (2020), si bien las formulaciones amina tienen baja volatilidad, las condiciones inadecuadas de aplicación pueden volverlas volátiles (en este caso a 35°C), y por ello, su nivel de daño fue similar a dicamba, que es altamente volátil dada su presión de vapor. La formulación de 2.4-D como micro emulsión determinó menor volatilización.

Figura 8

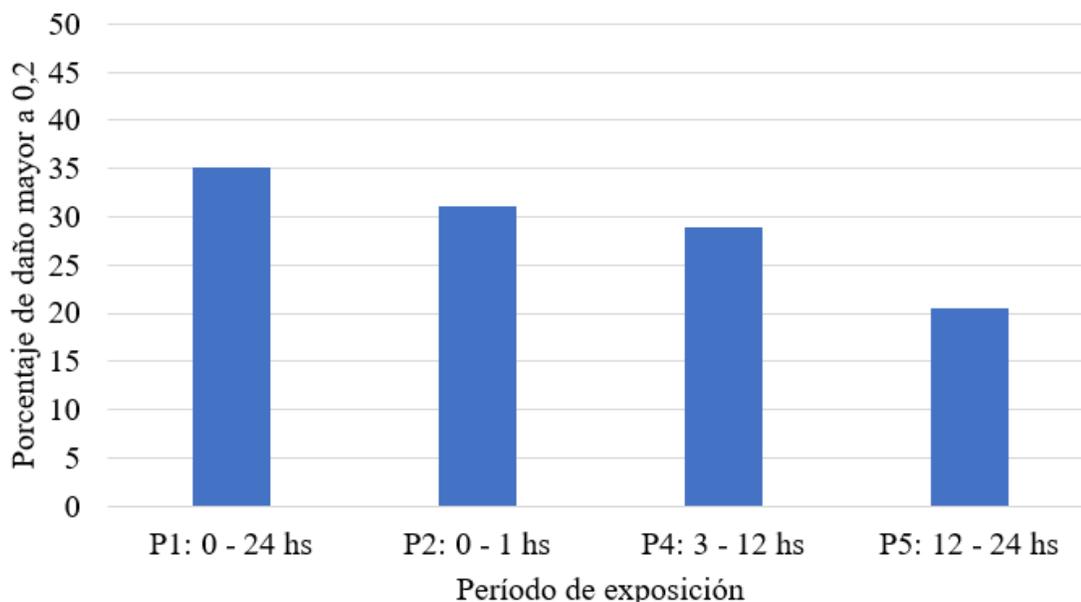
Porcentaje de la población con daño superior a 0.2 para cada condición de humedad del suelo en la evaluación de los 10 DPA



La condición de humedad del suelo, no determinó diferencias estadísticas significativas en la expresión de daño de las plantas bioindicadoras. Esto no era lo esperado, ya que es contradictorio a lo expresado por autores como Carbonari et al., (2020), que encontraron mayor volatilidad cuando el dicamba era aplicado sobre suelo húmedo en relación a suelo seco y paja.

Figura 9

Porcentaje de la población con daño superior a 0.2 para cada periodo de exposición en la evaluación de los 10 DPA



Cuando se evalúa el efecto del período de exposición, sin tener en cuenta el P3, porque fue sistemáticamente muy diferente a los demás valores (datos perdidos), hay una tendencia a mayor nivel de daño por efecto de volatilización, cuando las plantas han sido expuestas por más tiempo a los tratamientos, como es el caso de P1. A su vez, una leve tendencia a que, en las primeras horas luego de la aplicación, sería donde se da la mayor pérdida por volatilización. Los niveles de exposición inicial, determinaron niveles de daño mayores, por ello, el mayor daño se dio en los tratamientos P1 y P2, disminuyendo levemente en P4 y P5. Los altos valores de P4 y P5 se asocian al mayor tiempo de exposición, y en relación al periodo completo de exposición (P1), era esperable que el daño fuera menor, planteando la teoría que los gases liberados a los que están sujetos las plantas, van diluyéndose en el ambiente, lo que determinaría el menor daño al esperado.

Esto coincide con autores como Behrens y Lueschen (1979), los cuales detectaron daños en soja por Dicamba, durante 3 días luego de la aplicación en maíz, incrementándose rápidamente en la exposición a las 4 horas. Los mismos indican, que, extendiendo el tiempo a las 24 horas, no habría más aumentos significativos.

4.3 EXPERIMENTO 3

El análisis de varianza para todos los factores estudiados y sus interacciones (Tabla No. 13) indicaron diferencias significativas en las interacciones dobles, orientación x exposición y herbicida x distancia, a las 48 HPA; y orientación x herbicida, orientación x exposición y herbicida x distancia a los 21 DPA. A los 10 DPA no se encontraron diferencias significativas para ninguno de los factores de estudio.

Tabla 13

Análisis de varianza de las medias del porcentaje de la población, con daño superior a 0,2 en la evaluación de las 48 horas, 10 y 21 días post aplicación

Efecto	p- valor		
	48 HPA	10 DPA	21 DPA
Orientación	0,5458	0,9994	0,0162
Herbicida	0,0080	0,9751	0,0515
Tiempo de exposición	0,8473	1,0000	0,0114
Distancia	0,0273	1,0000	0,0042
Orientación x Herbicida	0,3059	0,7065	<0,0001
Orientación x Exposición	0,0213	1,0000	0,0103
Orientación x Distancia	0,7569	1,0000	0,9512
Herbicida x Exposición	0,7097	0,9997	0,1504
Herbicida x Distancia	0,0430	0,9730	0,0210
Exposición x Distancia	0,7923	0,9914	0,2578

Nota. Valores de p- valor <0,05 son significativamente diferentes.

Las medias del porcentaje de la población con daño superior a 0,2 a las 48 horas post aplicación, para las interacciones significativas de orientación x exposición y herbicida x distancia, se presentan en las tablas No. 14 y 15.

Tabla 14

Porcentaje de la población con daño superior a 0,2 en la evaluación de las 48 HPA para la interacción orientación x exposición

Orientación	Tiempo de exposición			
	0 a 2 horas	2 a 6 horas	6 a 24 horas	0 a 24 horas
Este	17,8 Aa	15,6 Aa	34,9 Aa	23,3 Aa
Norte	10,3 Aa	50,6 Aa	9,6 Aa	5,6 Aa
Oeste	17,8 Aa	19,4 Aa	21,7 Aa	27,5 Aa
Sur	21,7 Aa	9,6 Aa	6,9 Aa	32,6 Aa

Nota. Letras mayúsculas comparan tiempo de exposición dentro de orientación, letras minúsculas comparan orientación dentro de tiempo de exposición (Tukey $p < 0,05$).

El efecto de la orientación x el tiempo de exposición, a las 48 HPA fue significativo, pero la separación de las medias no logró identificar diferencias entre el nivel de un factor dentro de otro. De todos modos, cabe destacar que, hay cierto efecto en el nivel de daño (aunque sin diferencias estadísticas), sobre todo, en el tiempo de exposición 2 a 6 HPA, en la orientación Norte. Esto parece relacionarse a las condiciones ambientales en dicho periodo (figura No. 4), donde la humedad relativa promedio se ubicó en 77% y la temperatura en 26°C, siendo éstas, condiciones muy propicias para para acelerar el proceso de volatilización, tal como lo indican Behrens y Lueschen (1979). Por otro lado, y siendo éste un factor muy importante, la velocidad del viento fue leve, como puede verse en la tabla No. 16 (datos tomados de la estación meteorológica de la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni), y la dirección del viento en dicho periodo, estuvo la mayor parte del tiempo en dirección SE (tabla No. 15), lo cual explica que los gases volatilizados se dirigieran hacia el Norte-Noroeste, y, por tanto, es donde se registró el mayor nivel de daño.

Tabla 15

Porcentaje del tiempo según dirección del viento, por periodo de exposición

Tiempo de exp.	Dirección del viento (% del tiempo)							
	0-10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
0 a 2 horas	-	SSE	-	-	-	-	-	SE
2 a 6 horas	ENE	-	ESE	-	SE	-	-	-
6 a 24 horas	E	SE	-	-	-	-	ENE	-
0 a 24 horas	ESE/E	-	SE	-	-	ENE	-	-

Nota. Adaptado de P. Choca (comunicación personal, 27 de setiembre, 2021)

Tabla 16

Velocidad del viento promedio por período de exposición y valores máximos y mínimos registrados

Tiempo de exp.	Velocidad del viento (m/s)	
	Promedio del periodo	Máximo y mínimo registrado
0 a 2 horas	5,4	4,8 – 6,4
2 a 6 horas	2,0	0 – 6,4
6 a 24 horas	6,3	0 – 9,7
0 a 24 horas	5,1	0 – 9,7

Nota. Adaptado de P. Choca (comunicación personal, 27 de setiembre, 2021)

En los periodos de exposición 0 a 2 HPA y 6 a 24 HPA, los resultados en los niveles de daño no fueron claros, ya que se esperaba ver mayor nivel de daño en cada dirección, siguiendo el patrón de los vientos; sobre todo, en el periodo 0 a 2 HPA, donde el 80% del tiempo, el viento estuvo en dirección Sureste, y, por tanto, se esperaba que el mayor daño estuviese en las plantas ubicadas en la posición Norte y Oeste.

Si se evalúan los daños del periodo completo de exposición (0 a 24 HPA), hay mayor tendencia de daño en la población ubicada en las direcciones Este, Oeste y Sur. Por la dirección del viento, que se situó 60% del tiempo, en la dirección Este-Noreste, y el 30% del tiempo del Sureste, era esperable que los gases volatilizados fueran en las direcciones Oeste y Sur principalmente, por lo cual, no resulta claro los efectos de daño en las plantas del lado Este de la aplicación, que incluso tuvo nivel de daño similar a las situadas en dirección Oeste, donde era más probable que fueran dirigidas la mayor cantidad de gases volatilizados.

En la tabla No. 17, se presentan las medias en porcentaje de la interacción formulación 2,4-D x distancia.

Tabla 17

Porcentaje de la población con daño superior a 0,2 a las 48 HPA para la interacción formulación 2,4-D x distancia

Formulación	Distancia		
	2 m	10 m	20 m
2,4-D Colina	29,3 Aa	9,95 ABa	5,95 Ba
2,4-D dimetilamina	25,4 Aa	29,2 Aa	21,3 Aa

Nota. Letras mayúsculas comparan distancia dentro de formulación; letras minúsculas comparan formulación dentro de cada distancia (Tukey $p < 0,05$).

A las 48 HPA no hubo diferencias en las 2 formulaciones dentro de las distintas distancias, aunque hubo una leve tendencia a que, en los 10 y 20 m fue algo mayor el

daño para la exposición a 2,4-D dimetilamina con respecto a 2,4-D colina. Particularmente, en el caso de 2,4-D colina, el mayor daño lo generó a los 2 m, siendo diferente del daño generado a los 20 m, con un 80% menor. Mientras que en el caso de 2,4-D dimetilamina, no presentó diferencias en el daño generado en las 3 distancias, y siempre fue superior al 20% la población dañada en todas ellas.

En cierta parte, estos resultados tienen relación con lo comprobado por Sosnoskie et al. (2015), donde el 2,4-D formulado con sal colina no generó lesiones más allá de 1,5 m, aunque en el caso de la formulación con 2,4-D dimetilamina, dichos autores no vieron daño más allá de los 3 m y, en el presente experimento si, incluso a los 20 m. Una posible explicación por el daño de la formulación con 2,4-D dimetilamina a la mayor distancia evaluada, puede relacionarse a la cantidad de ingrediente activo (kg/ha) utilizado, el cual fue de 3,84 kg ia/ha, en comparación al experimento realizado por Sosnoskie et al. (2015), los cuales utilizaron 2,24 kg ia/ha. Otra posible explicación, es por las condiciones en la velocidad del viento en el estudio de dichos autores, el cual osciló entre 0,5 y 1,6 m/s, con una velocidad media diaria del viento de 1,0 m/s; sin embargo, en el experimento realizado en la EEMAC, los vientos oscilaron entre 0 a 9,7 m/s, con una velocidad media diaria de 6,0 m/s. Esto podría explicar que los gases volatilizados lleguen a mayores distancias.

De todas maneras, y más allá de que en el experimento se haya constatado daño de 2,4-D dimetilamina a una distancia mayor que la reportada en la bibliografía, el 2,4-D sal colina formulado como un concentrado soluble, con la tecnología Colex-D, fue el que generó menores niveles de volatilidad, expresado en el nivel de daño de la población, incluso evaluado a una dosis de 3,648 kg ia/ha y mayor velocidad de viento promedio, en relación a las condiciones de Sosnoskie et al. (2015).

A los 10 DPA no hubo diferencias significativas en los diferentes factores estudiados ni sus interacciones. Sin embargo, a los 21 DPA, la interacción orientación x formulación 2,4-D, orientación x exposición y formulación 2,4-D x distancia fueron significativas. Las medias en porcentaje se muestran en las tablas No. 18, 19 y 20.

Tabla 18

Porcentaje de la población con daño > 2 a los 21 DPA para la interacción formulación 2,4-D x orientación

Orientación	Herbicida	
	2,4-D Colina	2,4-D Dimetilamina
Este	95,0 Aa	64,1 Ba
Norte	12,4 Bc	88,0 Aa
Oeste	99,0 Aabc	98,4 Aa
Sur	57,8 Bb	88,7 Aa

Nota. Letras mayúsculas comparan formulación dentro de orientación; letras minúsculas comparan orientación dentro de formulación de 2,4-D (Tukey $p < 0,05$).

El de 2,4-D colina, determinó mayores porcentajes de plantas dañadas en las orientaciones este y oeste, seguidas por las ubicadas al sur. Como fuera explicado anteriormente, no se comprende el tan elevado daño en la ubicación Este.

En el caso de 2,4-D dimetilamina, no se constataron diferencias de daño en las plantas en las diferentes orientaciones. Seguramente, explicado por el mayor potencial de volatilización de esta formulación.

En el caso de la interacción orientación x tiempo de exposición (Tabla No. 19), es difícil explicar los resultados, porque como fue comentado anteriormente, los cambios en la dirección del viento han distribuido los gases volatilizados y esto llevó a que, en la última evaluación, no hubiera diferencias estadísticas entre el porcentaje de plantas con daño en todo el periodo de exposición, y, excepto para las plantas ubicadas al sur, los valores fueron muy similares.

Tabla 19

Porcentaje de la población con daño > 2 a los 21 DPA para la interacción orientación x tiempo de exposición

Orientación	Tiempo de exposición			
	0-2 horas	2 a 6 horas	6 a 24 horas	0 a 24 horas
Este	80,2 Aa	64,6 Aa	90,2 Aa	94,6 Aa
Norte	8,4 Ab	44,6 Aa	74,5 Aa	83,2 Aa
Oeste	50,1 Aab	55,3 Aa	78,9 Aa	100 Aa
Sur	77,7 Aab	88,9 Aa	84,9 Aa	42,7 Aa

Nota. Letras mayúsculas comparan exposición dentro de orientación; letras minúsculas comparan orientación dentro de exposición (Tukey $p < 0,05$).

Tabla 20

Porcentaje de la población con daño > 2 a los 21 DPA para la interacción formulación 2,4-D x distancia

Formulación	Distancia		
	2 m	10 m	20 m
2,4-D Colina	95,1 Aa	67,5 Ba	67,0 Ba
2,4-D dimetilamina	90,9 Aa	87,5 Aa	91,1 Aa

Nota. Letras mayúsculas comparan distancia dentro de formulación; letras minúsculas comparan formulación dentro de cada distancia (Tukey $p < 0,05$).

A los 21 DPA, se observó una tendencia muy similar, que en la evaluación de las 48 HPA. La población ubicada a la menor distancia desde la zona de aplicación (2 m), para el 2,4-D colina, presentó un 30% más en el nivel de daño, con respecto a los 10 y 20 m. Sin embargo, el 2,4-D dimetilamina, no tuvo mayores diferencias en el daño generado en las tres distancias evaluadas, manteniendo altos los porcentajes de plantas con daño. El nivel de daño generado por 2,4-D dimetilamina, fue aproximadamente 30% más, con respecto al de 2,4-D colina, a los 10 y 20 m de distancia desde la zona aplicada, tal como era esperado por las características distintivas de la formulación 2,4-D sal colina con la tecnología Colex-D. Contrastando con lo reportado por Sosnoskie et al. (2015), respecto al daño generado por el 2,4-D dimetilamina, el cual no sobrepasaba los 3 m de la distancia de aplicación, y que, al igual que en la evaluación a las 48 HPA, se puede concluir que puede verse nivel de daño por encima de dicha distancia, incluso hasta los 20 m.

5. CONCLUSIONES

Los mayores efectos de daño por volatilización, se relacionaron a los herbicidas utilizados y sus características de formulaciones, a las condiciones ambientales como la temperatura principalmente y la distancia de la zona de aplicación.

Teniendo en cuenta los resultados de los experimentos, se consideró destacable el comportamiento en la volatilización del herbicida 2.4-D Colina, y el menor daño producido en soja susceptible, con respecto a los demás herbicidas evaluados.

La condición de suelo húmedo y seco, no tuvo efectos claros en el daño por volatilización evaluado en los experimentos 1 y 2.

No fue posible detectar asociaciones claras entre efectos por volatilización, según dirección del viento y orientación y tiempo de exposición, en el experimento 3 a campo. Entendiendo que este tipo de parámetros, deberían estudiarse en situaciones donde sea posible disminuir el número de interacciones, para poder evaluar con mayor precisión los resultados obtenidos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, P. R. (2013). *Herbicidas asociados a la caña de azúcar y su potencial de contaminación del medio ambiente*. DIECA. <https://n9.cl/7y31f>
- Alvarez-Benedi, J., Tabemero, M. T., Atienza, J., & Bolado, S. (1999). A coupled model representing volatilisation and sorption of soil incorporated herbicides. *Chemosphere*, 38(7), 1583-1593. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(98\)00385-3](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(98)00385-3)
- Anzalone, A. (2007). *Herbicidas: Modos y mecanismos de acción en plantas*. Universidad Centrocidental “Lisandro Alvarado”. https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/47809/mod_resource/content/1/Herbicidas%20Modos%20y%20Mec%20accion%20Anzalone.pdf
- Aparicio, V., De Gerónimo, E., Hernández Guijarro, K., Pérez, D., Portocarrero, R., & Vidal, C. (2015). *Los plaguicidas agregados al suelo y su destino en el ambiente*. INTA. https://www.researchgate.net/publication/292985188_Los_plaguicidas_agregados_al_suelo_y_su_destino_en_el_ambiente
- Bedos, C., Cellier, P., Calvet, R., Barriuso, E., & Gabrielle, B. (2002). Mass transfer of pesticides into the atmosphere by volatilization from soils and plants: Overview. *Agronomie*, 22(1), 21-33. <https://doi.org/10.1051/agro:2001003>
- Behrens, R., & Lueschen, W. E. (1979). Dicamba volatility. *Weed Science*, 27(5), 486-493. <https://doi.org/10.1017/S0043174500044453>
- Bunch, T. R., Gervais, J. A., Buhl, K., & Stone, D. (2012). *Dicamba: Technical Fact Sheet*. Oregon State University. http://npic.orst.edu/factsheets/archive/dicamba_tech.html
- Carbonari, C., Costa, R., Bevilaqua, N., Pereira, V., Giovanelli, B., López Ovejero, R., Palhano, M., Barbosa, H., & Velini, E. (2020). Volatilization of standalone Dicamba and Dicamba plus glyphosate as function of volatility reducer and different surfaces. *Agriculture*, 10(11), Artículo e495. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110495>
- Charles, J. M., Hanley, T. R., Wilson, R. D., Van Ravenzwaay, B., & Bus, J. S. (2001). Developmental toxicity studies in rats and rabbits on 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid and its forms. *Toxicological Sciences*, 60(1), 121-131. <https://doi.org/10.1093/toxsci/60.1.121>

- Cherif, S., & Wortham, H. (1997). A new laboratory protocol to monitor the volatilization of pesticides from soils. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 68(2), 199-212.
<https://doi.org/10.1080/03067319708030491>
- Comité de Acción de Resistencia a Herbicidas. (2020). *¿Qué son los productos fitosanitarios?* <https://hrac-argentina.org/conceptos-basicos/>
- Comité de Articulación Institucional. (2020). *Informe CAI / LATU*.
<https://www.gub.uy/sites/gubuy/files/documentos/publicaciones/A5%20Informe%20CAI%20LATU%20Soja%20MON%2087708%20x%20MON89788%20x%20A5547-127.pdf>
- Conflicto entre vecinos por uso de soja Roundup Ready 2 Xtend. (2016, 11 de agosto). *Revista Chacra*. <https://www.revistachacra.com.ar/nota/9050-conflicto-entre-vecinos-por-uso-de-soja-roundup-ready-2-xtend/>
- Cunha, J. P. A., Teixeira, M. M., Castillo, B., & Rodrigues, G. (2010). Formulación de agroquímicos para el control de plagas. En J. C. Magdalena, B. Castillo Herrán, A. Di Prinzio, I. Homer Bannister, & J. Villalba (Eds.), *Tecnología de aplicación de agroquímicos* (pp. 27-44). INTA.
- Cuvaca, I., Knezevic, S., & Scott, J. (2021). Dicamba-tolerant soybean response to 2,4-D micro-rates at three growth stages. *European Journal of Applied Sciences*, 9(3), 581-590. <https://doi.org/10.14738/aivp.93.10433>
- Davie Martin, C. L., Hageman, K. J., Chin, Y. P., Rougé, V., & Fujita, Y. (2015). Influence of temperature, relative humidity, and soil properties on the soil-air partitioning of semivolatile pesticides: Laboratory measurements and predictive models. *Environmental Science & Technology*, 49(17), 10431-10439. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02525>
- De Esteban, M., & Sansot, D. (2017). *Síntomas de fitotoxicidad en el cultivo de soja de los herbicidas más usados en post emergencia*. Dow AgroSciences.
<https://www.corteva.com.ar/content/dam/dpagco/corteva/la/ar/es/products/files/DOC-Fitotixidad-Espa%C3%B1ol.pdf>
- De Esteban, M. E., Apestegui, M. A., Bistolfi, G., Fadda, D. E., Fluguerto Marti, P., Gerardo, U., & Sansot, D. (2018). Eficacia de control de diferentes formulaciones de 2,4-D y otros herbicidas auxínicos sobre *Amaranthus hybridus* resistente a glifosato en la Argentina. *Malezas*, (4), 54-63.
<https://hrac-argentina.org/descarga-archivos/Revista-Malezas-ASACIM-04-2020.pdf>

- Dexter, A. G. (1993). *Herbicide spray drift*. North Dakota State University Extension Service. <https://www.mssoy.org/uploads/files/ndsu-ext-a-657.pdf>
- Economía.uy. (2021, 4 de agosto). *Soja: Principal cultivo agrícola uruguayo*. <https://www.economiauy.net/soja/>
- Fernández, G., Villaba, J., & Scaglia, L. (2013). El manejo de herbicidas y la situación actual de malezas. En A. Ribeiro & H. Silva (Eds.), *III Simposio Nacional de Agricultura* (pp. 125-132). Facultad de Agronomía. <https://nomato.files.wordpress.com/2014/11/grisel-fernandez-3c2ba-simposio.pdf>
- Frene, R. (2020). Enlist sistema de control de malezas: Cómo funciona el sistema y qué soluciones ofrece a la problemática en Argentina. *Malezas*, (3), 52-57. http://www.asacim.org.ar/wp-content/uploads/2020/06/ASACIM_03-final.pdf
- Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2017). *Resolución n° 87/017: Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja DAS44406-6*. gub.uy. <https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-87017-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>
- Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2020). *Resolución n° 107/020: Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja MON87708*. gub.uy. <https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-107020-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>
- Gervais, J., Luukinen, B., Buhl, K., & Stone, D. (2008). *2,4-D: Technical fact sheet*. National Pesticide Information Center. <http://npic.orst.edu/factsheets/archive/2,4-DTech.html>
- Gómez, E. (2020, 14 de agosto). *Plaguicidas: Características y transporte en el ambiente*. AgroSpray. <https://agrospray.com.ar/blog/plaguicidas/>
- Grass, B., Wenclawiak, B. W., & Rüdell, H. (1994). Influence of air velocity, air temperature, and air humidity on the volatilisation of trifluralin from soil. *Chemosphere*, 28(3), 491-499. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(94\)90293-3](https://doi.org/10.1016/0045-6535(94)90293-3)
- Griffin, J. L., Bauerle, M. J., Stephenson III, D. O., Miller, D. K., & Boudreaux, J. M. (2013). Soybean response to Dicamba Applied at vegetative and reproductive growth stages. *Weed Technology*, 27(4), 696-703. <https://doi.org/10.1614/WT-D-13-00084.1>

- Hartzler, B. (2017a, 27 de diciembre). *Dicamba: Past, present, and future*. Iowa State University Extension and Outreach.
<https://crops.extension.iastate.edu/blog/bob-hartzler/dicamba-past-present-and-future>
- Hartzler, B. (2017b, 16 de agosto). *Factors influencing Dicamba volatility*. Iowa State University Extension and Outreach.
<https://crops.extension.iastate.edu/blog/bob-hartzler/factors-influencing-dicamba-volatility>
- Heap, I. (1993-2023). *The international herbicide-resistant weed database*.
<https://www.weedscience.com/Home.aspx>
- Instituto Regional de Estudios de Sustancias Tóxicas. (s.f.a). *2,4-D*.
<http://www.plaguicidasdecentroamerica.una.ac.cr/index.php/base-de-datos-menu/5-24-d>
- Instituto Regional de Estudios de Sustancias Tóxicas. (s.f.b). *DICAMBA*.
<http://www.plaguicidasdecentroamerica.una.ac.cr/index.php/base-de-datos-menu/177-dicamba>
- La genética Don Mario con tecnología Enlist y las estrategias para mejorar el control de malezas. (2021, 6 de octubre). *Revista Verde*.
<https://revistaverde.com.uy/agricultura/barraca-erro-presento-la-genetica-don-mario-con-tecnologia-enlist/>
- Manteniendo los herbicidas a raya: ¿Qué es la deriva y cómo controlarla?* (2022, 31 de mayo). *Aapresid*. <https://www.aapresid.org.ar/blog/manteniendo-herbicidas-rama-deriva-controlarla>
- Monaco, T. J., Weller, S. C., & Ashton, F. M. (2002). *Weed science: Principles and practices* (4th ed.). John Wiley & Sons.
https://books.google.co.ve/books?id=1X37B5QKR04C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_vpt_read#v=onepage&q&f=false
- Mondino, M. (2020). *Daños del herbicida 2,4-D en el cultivo de algodón*. INTA.
- Montoya, J. C. (2017). *Comportamiento de los herbicidas en el suelo*. INTA.
- Montoya, J. C., & Porfiri, C. (s.f.). *Estudio de la volatilidad de diferentes formulaciones de 2,4-D* [Contribución]. XXV Congreso AAPRESID Kairós, Rosario. <https://docplayer.es/65787358-Estudio-de-la-volatilidad-de-diferentes-formulaciones-de-2-4-d.html>

- Mueller, T., & Steckel, L. (2019). Dicamba volatility in humidomes as affected by temperature and herbicide treatment. *Weed Technology*, 33(4), 541-546. <https://doi.org/10.1017/wet.2019.36>
- Nash, R. G. (1983). Comparative volatilization and dissipation rates of several pesticides from soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 31(2), 210-217. <https://doi.org/10.1021/jf00116a007>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (s.f.). *Series históricas: Base de datos*. MGAP. <http://www.mgap.gub.uy/serieshistoricas/hshistoricas.aspx#>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2021). *Resultados de la Encuesta agrícola "Primavera 2021"*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/Comunicado_%20Agr_Prim_%202021.pdf
- Ouse, D. G., Gifford, J. M., Schleier, J., Simpson, D. D., Tank, H. H., Jennings, C. J., Annangudi, S. P., Valverde-Garcia, P., & Masters, R. A. (2018). A new approach to quantify herbicide volatility. *Weed Technology*, 32(6), 691-697. <https://doi.org/10.1017/wet.2018.75>
- Oyhantçabal, G., & Narbondo, I. (2008). *Radiografía del agronegocio sojero: Descripción de los principales actores y los impactos socio-económicos en Uruguay*. REDES; Uruguay sustentable. <https://www.redes.org.uy/wp-content/uploads/2009/08/Agronegocio-Sojero-web2.pdf>
- Papa, J. C., & Tuesca, D. (2014). Los problemas actuales de malezas en la región sojera núcleo argentina: Origen y alternativas de manejo. En A. Ríos (Ed.), *Viabilidad del glifosato en sistemas productivos sustentables* (pp. 59-74). INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7629/1/18429080413103109.pdf>
- Peterson, M. A., McMaster, S. A., Riechers, D. E., Skelton, J., & Stahlman, P. W. (2016). 2,4-D past, present, and future. *Weed Technology*, 30(2), 303-345. <https://doi.org/10.1614/WT-D-15-00131.1>
- Presión de vapor. (2014). SlideShare. <https://es.slideshare.net/PedroSoteloValdez/presin-de-vapor>
- Productiva Comunicación & Marketing. (2022, 25 de agosto). *Intacta2 Xtend: Nueva era de soja llega a Paraguay*. <https://www.productivacm.com/intacta2-xtend-nueva-era-de-soja-llega-a-paraguay/>

- Que Hee, S. S., & Sutherland, R. G. (1974). Volatilization of various esters and salts of 2,4-D. *Weed Science*, 22(4), 313-318. <http://www.jstor.org/stable/4042312>
- Qurratu, A., & Reehan, A. (2016). A review of 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) derivatives: 2,4-D dimethylamine salt and 2,4-D butyl ester. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(19), 9946-9955.
- Salas, P., & Sarubbi, H. (2013). Manejo de malezas en el cultivo de soja en el Paraguay. En A. Ríos (Ed.), *Viabilidad del glifosato en sistemas productivos sustentables* (pp. 131-136). INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7633/1/st-204-2013.-p.131-136.pdf>
- Sall, E. D., Huang, K., Pai, N., Schapaugh, A. W., Honegger, J. L., Orr, T. B., & Riter, L. S. (2020). Quantifying Dicamba volatility under field conditions: Part II, comparative analysis of 23 Dicamba volatility field trials. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(8), 2286-2296. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31990541/>
- Sawchik, J. (1996). Movimiento y transformación de los herbicidas en el suelo. En A. Morón, D. Martino, & J. Sawchik (Eds.), *Manejo y fertilidad de suelos* (pp. 89-94). INIA. <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219240807135249.pdf>
- Se autorizaron nuevos eventos biotecnológicos. (2020, 17 de diciembre). *Revista Verde*. <https://revistaverde.com.uy/agricultura/se-autorizacion-nuevos-eventos-biotecnologicos/>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2013). *Segunda fase de evaluación: Documento de decisión*. MAGP. <https://docplayer.es/41093511-Ministerio-de-agricultura-ganaderia-y-pesca-secretaria-de-agricultura-ganaderia-y-pesca.html>
- Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria. (2016). *Documento de decisión: Evaluación de la aptitud alimentaria del evento de soja MON 87708 × MON 89788 (OECD: MON-87708-9 × MON-89788-1)*. http://www.senasa.gob.ar/sites/default/files/ARBOL_SENASA/INFORMACION/25_documento_de_desicion_soja_mon87708_x_89788_listo.pdf
- Soja XtendFlex vs Enlist E3: La fuerte disputa por el mercado de semillas de Estados Unidos. (2021, 12 de abril). *Agrofy News*. <https://news.agrofy.com.ar/noticia/193081/soja-xtendflex-vs-enlist-e3-fuerte-disputa-mercado-semillas-estados-unidos>

- Sosnoskie, L. M., Culpepper, A. S., Braxton, L. B., & Richburg, J. S. (2015). Evaluating the volatility of three formulations of 2,4-D when applied in the field. *Weed Technology*, 29(2), 177-184. <https://doi.org/10.1614/WT-D-14-00128.1>
- Spencer, W. F., & Cliath, M. M. (1973). Pesticide volatilization as related to water loss from soil. *Journal of Environmental Quality*, 2(2), 284-289. <https://doi.org/10.2134/jeq1973.00472425000200020026x>
- Tecnología para el control de malezas en soja y maíz. (2021, 7 de marzo). *El País*. <https://rurales.elpais.com.uy/agricultura/tecnologia-para-el-control-de-malezas-en-soja-y-maiz>
- Villalba, J., Collazo, M., Besil, N., Rezende, S., & Cesio, V. (2016). Clomazone: Factores afectando la volatilización y su manejo. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Presentación resultados experimentales de arroz: Zafra 2015-2016* (pp. 25-28). <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/9877/1/SAD-766p25-28.pdf>
- Ximenis Joven, C. (2019). *Empleo de glifosato en suelos agrícolas: Impacto sobre la salud y el medio ambiente* [Trabajo final de grado, Universidad Complutense de Madrid]. UCM. <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/CARMEN%20XIMENIS%20JOVEN.pdf>

7. ANEXOS**Tabla A1**

Autorizaciones de eventos transgénicos en soja, para producción, uso comercial, consumo directo o transformación en Uruguay

Año	Evento	Empresa solicitante	Resistencia
1996	GTS 40-3-2	Nidera S.A	Glifosato
2012	A5547-127	Bayer S.A	Glufosinato de amonio
	A2704-12		
	MON89788 x MON87701	Monsanto Uruguay S.A	Glifosato y algunos insectos lepidópteros
2014	BPS-CV127-9	Basf Uruguay S.A	Imidazolinonas
2017	MON89788 x MON87708	Monsanto Uruguay S.A	Glifosato y Dicamba
	MON89788 x MON87701 x MON87708 x MON87751		Glifosato, Dicamba y lepidópteros
	MON89788 x MON87708 x A5547-127		Glifosato, Dicamba y Glufosinato de amonio
	DAS44406-6	DasAgro Uruguay S.A	Glifosato, Glufosinato de amonio y 2,4-D
2020	FG72	Basf Uruguay S.A	Glifosato, Isoxaflutole
	FG72XA5547-127		Glifosato, Isoxaflutole y Glufosinato de amonio
	MON87701	Monsanto Uruguay S.A	Lepidópteros
	MON89788		Glifosato y

			lepidópteros
	MON87708		Dicamba
2021	MON89788 x MON87701 x MON87708 x MON87751	Bayer S.A	Lepidópteros, Dicamba y Glifosato
	MON89788 x MON87708 x A5547-127		Glifosato, Dicamba, Glufosinato de amonio
	MON87751		Lepidópteros
2022	SYN-ØØØH2-5	Syngenta Agro Uruguay S.A. y Basf Uruguay S.A	Glufosinato de amonio y los pertenecientes a la familia de los inhibidores de la p- hidroxifenilpiruvato dioxigenasa (HPPD)
	DAS44406-6XDAS81419-2	Corteva Agriscience Uruguay S.A	Glufosinato de amonio, glifosato y 2,4-D, y resistencia a ciertos insectos lepidópteros plaga

Nota. Elaborado con base en GBNbio (1996, 2012a, 2012b, 2012c, 2014, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e, 2021a, 2021b, 2021c, 2022a, 2022b).

Bibliografía Anexo

Gabinete Nacional de Bioseguridad. (1996, 2 de octubre). *Resolución S/N/996 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de Soja 40-3-2.* gub.uy.

<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-sn996-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para-consumo>

Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2012a, 19 de setiembre). *Resolución N° 43/012 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja A5547-127.* gub.uy.

<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-43012-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>

- Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2012b, 19 de setiembre). *Resolución N° 44/012 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja A2704-12*. gub.uy.
<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-44012-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>
- Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2012c, 19 de setiembre). *Resolución N° 50/012 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja MON89788XMON87701*. gub.uy.
<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-50012-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>
- Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2014, 29 de octubre). *Resolución N° 54/014 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja BPS-CV127-9*. gub.uy.
<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-54014-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>
- Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2017a, 15 de diciembre). *Resolución N° 76/017 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja MON89788XMON87708*. gub.uy.
<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-76017-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>
- Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2017b, 1 de noviembre). *Resolución N° 79/017 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja MON89788XMON87701XMON87708XMON87751*. gub.uy. <https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-79017-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>
- Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2017c, 1 de noviembre). *Resolución N° 84/017 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja MON89788XMON87708XA5547-127*. gub.uy.
<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-84017-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>
- Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2017d, 15 de diciembre). *Resolución N° 87/017 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja DAS44406-6*. gub.uy.
<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-87017-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>
- Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2020a, 9 de diciembre). *Resolución N° 94/020 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o*

transformación de soja FG72. gub.uy.

<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-94020-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>

Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2020b, 9 de diciembre). *Resolución N° 100/020 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja FG72XA5547-127.* gub.uy.

<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-100020-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>

Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2020c, 9 de diciembre). *Resolución N° 105/020 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja MON87701.* gub.uy.

<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-105020-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>

Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2020d, 9 de diciembre). *Resolución N° 106/020 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja MON89788.* gub.uy.

<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-106020-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>

Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2020e, 9 de diciembre). *Resolución N° 107/020 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja MON87708.* gub.uy.

<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-107020-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>

Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2021a, 5 de noviembre). *Resolución N° 123/021 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja MON89788XMON87701XMON87708XMON87751.* gub.uy.

<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-123021-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>

Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2021b, 5 de noviembre). *Resolución N° 124/021 Autorización para producción y uso comercial, para consumo directo o transformación de soja MON89788XMON87708XA5547-127.* gub.uy.

<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-124021-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>

Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2021c, 5 de noviembre). *Resolución N° 131/021 Autorización para producción y uso comercial para consumo directo o transformación de soja MON87751.* gub.uy.

<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-131021-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>

Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2022a, 12 de agosto). *Resolución N° 147/022 Autorización para producción y uso comercial para consumo directo o transformación de soja con el evento SYN-ØØØH2-5*. gub.uy.

<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-147022-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>

Gabinete Nacional de Bioseguridad. (2022b, 16 de noviembre). *Resolución N° 148/022 Autorización para producción y uso comercial para consumo directo o transformación autorización de soja con los eventos combinados DAS44406-6XDAS81419-2*. gub.uy.

<https://www.gub.uy/institucional/normativa/resolucion-n-148022-autorizacion-para-produccion-y-uso-comercial-para>