

Agricultura de Conservación: Impacto en la Disipación de Herbicidas

Conservation Agriculture: Impact on the Dissipation of Herbicides

Marwa Douibi, María José Carpio, María Jesús Sánchez-Martín,
María Sonia Rodríguez-Cruz & Jesús María Marín-Benito*

*Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca (IRNASA-CSIC), Cordel de Merinas 40-52, 37008 Salamanca, España
(*E-mail: jesusm.marin@irnasa.csic.es)*

<https://doi.org/10.19084/rca.28607>

R E S U M E N

La acumulación de restos vegetales en la superficie de suelo (mantillo) y el no laboreo del suelo representan una práctica agrícola de conservación del suelo frecuente que puede modificar la disipación de los herbicidas que se aplican en estos sistemas agrícolas. El objetivo de este trabajo fue estudiar a escala de campo: i) la disipación de los herbicidas S-metolacolor (SMOC), foramsulfuron (FORAM) y tiencarbazona-metil (TIEN), ii) la formación de metabolitos, y iii) la actividad deshidrogenasa (DHA) del suelo bajo prácticas de laboreo tradicional (LT) y de conservación (NL) en un suelo agrícola con dos contenidos diferentes en carbono orgánico (CO) superficial (S1 y S2). La disipación de los herbicidas fue más rápida en los suelos con NL que en los suelos LT teniendo lugar mayoritariamente en la superficie del mantillo. Los tiempos de vida media (DT_{50}) bajo los diferentes tratamientos variaron entre 1,7-30,2 (SMOC), 3,7-8,8 (FORAM) y 5,2-25,2 (TIEN) días. La menor cantidad de metabolitos observada en los suelos bajo NL coincidió con la menor cantidad de herbicidas que llegó a la superficie de estos suelos resultado de su interceptación parcial por el mantillo. La DHA fue mayor en los suelos no tratados con herbicida y bajo NL.

Palabras clave: disipación, herbicida, suelo, agricultura de conservación, campo.

A B S T R A C T

The accumulation of crop residues on the soil surface (mulch) and no-tillage of the soil represent a current agricultural practice for soil conservation that can modify the dissipation of herbicides applied in these agricultural systems. The objective of this work was to study at field scale: i) the dissipation of the herbicides S-metolachlor (SMOC), foramsulfuron (FORAM) and thiencazone-methyl (TIEN), ii) the formation of metabolites, and iii) the soil dehydrogenase activity (DHA) under traditional (LT) and conservation (NL) tillage practices in an agricultural soil with two different surface organic carbon (CO) contents (S1 and S2). Herbicide dissipation was faster in NL than in LT soils, taking place mainly on the mulch surface. The half-lives (DT_{50}) under the different treatments varied between 1.7-30.2 (SMOC), 3.7-8.8 (FORAM) and 5.2-25.2 (TIEN) days. The lower amount of metabolites observed in the soils under NL agreed with the lower amount of herbicides that reached the soil surface as a result of their partial interception by the mulch. Soil DHA was higher in soils untreated with herbicide and under NL.

Keywords: dissipation, herbicide, soil, conservation agriculture, field.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de herbicidas para el control de las malas hierbas en los sistemas de laboreo de conservación del suelo caracterizados por el no laboreo, la siembra directa, el uso de cultivos de cobertura y la acumulación de sus residuos de cosecha en la superficie de suelo (mantillo) es una práctica agrícola frecuente. Los cambios físicos, químicos y biológicos que experimenta el suelo bajo estas prácticas de laboreo de conservación pueden modificar fuertemente la disipación de los herbicidas con respecto a la que experimentan en un sistema de laboreo tradicional con la interceptación de los herbicidas por el mantillo jugando un papel adicional y fundamental en este proceso (Carpio *et al.*, 2022). La influencia de estas prácticas agrícolas de conservación en la disipación de los herbicidas ha sido mayoritariamente evaluada mediante estudios de laboratorio siendo poco frecuentes este tipo de estudios a escala de campo (Cassigneul *et al.*, 2018).

El objetivo de este trabajo fue estudiar el impacto de prácticas agrícolas de conservación del suelo en la disipación de los herbicidas SMOC, FORAM y TIEN. Se evaluó la cinética de disipación de estos compuestos y la formación de metabolitos en un suelo agrícola a escala de campo bajo prácticas de laboreo tradicionales y de conservación durante un ciclo de maíz. Se determinó también la DHA en cada uno de los tratamientos para analizar el efecto de los herbicidas y el tipo de práctica agrícola en la actividad microbiana del suelo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Herbicidas

Los herbicidas estudiados (SMOC, FORAM y TIEN) se consideran no persistentes en el suelo con valores de DT_{50} inferiores a 23,2 días a escala de campo. Su solubilidad en agua es 0,480, 3,3 y 0,436 g L⁻¹, y el potencial de lixiviación (índice GUS) es 2,32, 2,95 y 2,46 para SMOC, FORAM y TIEN, respectivamente. Los metabolitos analizados fueron los ácidos etanosulfónico (SMOC-ESA) y oxanílico (SMOC-OA) del SMOC, y el 4,6-dimetoxipirimidin-2-amina (metabolito FORAM). La solubilidad en agua de SMOC-ESA, SMOC-OA y metabolito FORAM es de 212, 360 y 5,5 g L⁻¹, y su índice GUS 7,22, 6,88 y 1,21, respectivamente (PPDB, 2022).

Experimento de campo

El estudio de campo se llevó a cabo en parcelas experimentales de 81 m² ubicadas en la finca experimental Muñovela del IRNASA-CSIC (Salamanca, España). El diseño consistió en un total de 16 parcelas experimentales distribuidas al azar entre 4 tratamientos, resultantes de la combinación de 2 sistemas de laboreo y 2 suelos diferentes, y cada una de ellas con 4 repeticiones. Los suelos corresponden a un único suelo agrícola de textura franco arenosa, pero con distinto contenido en CO superficial (S1, 0,7%, y S2, 1,2%). Los sistemas de laboreo corresponden a un laboreo tradicional con cultivador (25-28 cm) (S1+LT y S2+LT) y al no laboreo del suelo (S1+NL y S2+NL) en un sistema de monocultivo de maíz. La siembra de maíz se realiza mediante siembra directa sobre suelo desnudo en las parcelas S1+LT y S2+LT mientras que en las parcelas S1+NL y S2+NL se realiza sobre los restos vegetales (mantillo) de trigo de invierno que se sembró como cultivo de cobertura durante el período de barbecho y que una vez destruido químicamente con glifosato y cortado se depositó sobre la superficie del suelo cubriendo más del 85% de ésta.

Los herbicidas (formulaciones comerciales) se aplicaron manualmente con un pulverizador acoplado a una mochila de espalda en pre-emergencia del maíz en junio de 2021 a las dosis de 0,993 (SMOC), 0,800 (FORAM) y 0,254 (TIEN) kg i.a. ha⁻¹. La aplicación se realizó en 8 parcelas (2 réplicas por tratamiento) mientras que otras 8 parcelas (2 réplicas por tratamiento) no fueron tratadas con los herbicidas para ser utilizadas como suelos control en el estudio microbiológico.

Estudio de disipación y microbiológico

Se tomaron muestras superficiales de suelo (0-10 cm) a 18 tiempos diferentes entre 1 y 153 días después de la aplicación de los herbicidas (d.d.a.). Las muestras de cada parcela (10) se mezclaron, tamizaron (< 2 mm) y se congelaron a -18°C hasta la extracción y análisis de los herbicidas.

La extracción y concentración de los herbicidas/metabolitos de las muestras de suelo se realizó siguiendo los métodos descritos por Carpio *et al.* (2021). La determinación analítica de los herbicidas

y metabolitos se llevó a cabo mediante UPLC-QTOF-MS (Agilent Technologies, Avondale, AZ, USA). Se utilizó una columna Zorbax® Eclipse Plus C18 (50 × 2,1 mm, 1,8 μm) de Agilent mantenida a 30°C. El gradiente de trabajo para la separación y cuantificación óptima de todos los compuestos fue: 1) 0 – 0,25 min: 95% de agua + 0,1% de ácido fórmico (A) y 5% de acetonitrilo (B); 2) 0,25 – 2,5 min: 55% A y 45% B; 3) 2,5 – 3,5 min: 100% B; 4) 3,5 – 4 min: 95% A y 5% B. La velocidad de flujo fue 0.4 mL min⁻¹. El espectrómetro de masas operó en modo Dual AJS ESI con ionización en positivo. Se cuantificó el ion molecular positivo [m/z] [M]⁺ 156,08 (metabolito FORAM), 330,14 (SMOC-ESA), 280,15 (SMOC-OA), 284,14 (SMOC), 391,04 (TIEN), y 453,12 (FORAM), y los tiempos de retención fueron 1,45, 2,58, 3,20, 3,81, 3,18 y 2,90 min, respectivamente.

Las cinéticas de disipación de los herbicidas se ajustaron a un modelo cinético de primer orden (SFO) o primer orden multicompartimental (FOMC) y se calcularon los valores de DT₅₀ de los herbicidas para cada uno de los tratamientos ensayados (FOCUS, 2006).

La DHA del suelo en cada uno de los tratamientos ensayados se determinó en muestras de suelo (<2 mm) frescas muestreadas a 0, 34 y 152 días d.d.a. usando el método descrito por Tabatabai (1994).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las cinéticas de disipación de SMOC se ajustaron mejor a un modelo cinético SFO en el S1 bajo los dos tipos de laboreo ensayados mientras que en el S2 lo hicieron a un modelo cinético FOMC. El modelo cinético SFO describió mejor la cinética de disipación de FORAM y TIEN en los dos suelos bajo laboreo tradicional, mientras que las cinéticas de disipación de ambos compuestos se ajustaron mejor al modelo cinético FOMC bajo el laboreo de conservación en los dos suelos. En la Tabla 1 se incluyen los valores de DT₅₀ para los tres herbicidas en ambos suelos bajo laboreo tradicional y de conservación.

Estos valores mostraron el mismo orden de disipación en los dos suelos con laboreo tradicional (SMOC < TIEN < FORAM) con valores de DT₅₀ siempre mayores en S2+LT que en S1+LT. Este orden

de disipación está de acuerdo con los valores de los coeficientes de distribución (K_d) determinados en el laboratorio a una concentración de equilibrio (C_e) de 25 mg L⁻¹ mediante la técnica batch en equilibrio (Tabla 1). La mayor adsorción de los herbicidas en el suelo con el mayor contenido en CO (S2) disminuyó su biodisponibilidad para ser degradados y/o movilizados a horizontes más profundos del suelo.

El orden de disipación de los herbicidas en los suelos bajo laboreo de conservación fue más heterogéneo que el observado en los suelos con laboreo tradicional (TIEN < SMOC ≈ FORAM en el S1+NL, y TIEN ≈ FORAM < SMOC en el S2+NL) resultado posiblemente de la alta superficie de suelo cubierto por el mantillo (>85%) y del distinto grado de homogeneidad en la distribución del mantillo en la superficie de estos suelos que condicionó la cantidad de herbicidas que alcanzó la superficie del suelo (13-43%) respecto a la dosis aplicada. La disipación de los tres herbicidas fue más rápida en S1+NL y S2+NL que en los suelos bajo laboreo tradicional, aunque hay que destacar que más del 56% de la disipación de los compuestos tuvo lugar en el mantillo. Este comportamiento también ha sido observado por otros autores en estudios de laboratorio (Cassigneul, et al., 2018). Los valores de DT₅₀ de los herbicidas disminuyeron entre 5,2-17,8 (SMOC), 1,4-1,7 (FORAM) y 2,8-48 veces en los suelos con mantillo en comparación con el correspondiente suelo sin mantillo.

Tabla 1 - Vidas medias (DT50, días) y coeficientes de distribución (K_d, mL g⁻¹) de los herbicidas en los suelos bajo laboreo tradicional y de conservación

Tratamiento	SMOC		FORAM		TIEN	
	DT ₅₀	K _d	DT ₅₀	K _d	DT ₅₀	K _d
S1+LT	20,9	1,34	5,0	-	18,7	0,01
S1+NL	4,0		3,7		6,6	
S2+LT	30,2	2,00	8,8	0,09	25,2	0,40
S2+NL	1,7		5,1		5,2	

Los tres metabolitos analizados fueron detectados en los extractos de suelo de todos los tratamientos durante el experimento de disipación. Las cantidades de metabolitos detectadas fueron siempre

mayores en los suelos bajo laboreo tradicional que en los suelos con laboreo de conservación de acuerdo con la mayor cantidad del correspondiente herbicida aplicado que alcanzó el suelo bajo el tratamiento sin mantillo. El metabolito SMOC-ESA fue detectado siempre en cantidades más altas que el SMOC-OA aunque fue el metabolito FORAM el que se detectó en mayor proporción respecto a la dosis de herbicida añadida.

La DHA disminuyó en los suelos tratados con los herbicidas en comparación con los respectivos controles (sin herbicidas) a los tres tiempos analizados, aunque esta disminución fue sólo significativa ($p < 0.05$) en el S1+NL a $t=0$ y 34 días. La DHA fue mayor en los dos suelos en condiciones de no laboreo que bajo laboreo tradicional a los tres tiempos de estudio debido posiblemente a la mayor población microbiana del suelo (Gil Ribes *et al.*, 2017).

CONCLUSIONES

Las cinéticas de disipación de los herbicidas SMOC, FORAM y TIEN en suelos bajo prácticas de laboreo

tradicional y de conservación pusieron de manifiesto el fuerte impacto de la presencia del mantillo en la disipación de los herbicidas. El mantillo, donde tuvo lugar más del 50% de la disipación de los herbicidas, aceleró este proceso en comparación con lo observado en los suelos con laboreo tradicional. La aplicación de los herbicidas disminuyó la DHA de los suelos mientras que se vio potenciada en los suelos bajo condiciones de no laboreo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por MCIU/AEI/FEDER, UE (Proyecto RTI2018-101587-J-I00). Se agradece al proyecto "CLU-2019-05 – Unidad de Excelencia IRNASA-CSIC", financiado por la Junta de Castilla y León y cofinanciado por la Unión Europea (FEDER "Europa impulsa nuestro crecimiento"). María José Carpio agradece a la Junta de Castilla y León por su contrato predoctoral cofinanciado por el Fondo Social Europeo. Marwa Douibi agradece al Ministerio de Educación Superior del Gobierno de Argelia por su beca predoctoral.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carpio, M.J.; Douibi, M.; Sánchez-Martín, M.J.; Rodríguez-Cruz, M.S. & Marín-Benito, J.M. (2021) - Disipación de herbicidas en campo: Agricultura conservación vs. agricultura convencional. *In: Solos e Desenvolvimento Sustentável: Desafios e Soluções*, p. 310-316. Porto: U. Porto Press.
- Carpio, M.J.; Rodríguez-Cruz, M.S.; Sánchez-Martín, M.J. & Marín-Benito, J.M. (2022) - Pesticide fate in soils under different agricultural management practices. *In: Pesticides in soils. Occurrence, fate, control and remediation*, p. 251-286. The Handbook of Environmental Chemistry, vol. 113. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Cassigneul, A.; Benoit, P.; Nobile, C.; Bergheaud, V.; Dumény, V.; Etiévant, V.; Maylin, A.; Justes, E. & Alletto, L. (2018) - Behaviour of S-metolachlor and its oxanilic and ethanesulfonic acids metabolites under fresh vs. partially decomposed cover crop mulches: a laboratory study. *Science of the Total Environment*, vol. 631-632, p. 1515-1524. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.143>
- FOCUS (2006) - *Guidance Document on estimating persistence and degradation kinetics from environmental fate studies on pesticides in EU registration*. Report of the FOCUS work group on degradation kinetics. EC Documents Reference Sanco/10058/2005 version 2.0.
- Gil Ribes, J.A.; Ordóñez Fernández, R.; González Sánchez, E.J.; Veroz González, O.; Gómez Ariza, M. & Sánchez Ruiz, F. (2017) - *Beneficios de la agricultura de conservación en un entorno de cambio climático*. Córdoba: AEACSV.
- PPDB (2022) - *Pesticide Properties Data Base*. University of Hertfordshire. [cit. 2022.03.15] <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm>
- Tabatabai, M.A. (1994) - Soil enzymes. *In: Methods of Soil Analysis, Part 2-Microbiological and Biochemical Properties*, p. 903-947. Madison, WI, USA: SSSA.