

Evaluación multi-criterio de tres estrategias de gestión de malas hierbas en sistemas cerealistas

FERNÁNDEZ-QUINTANILLA C, PEÑA JM, HERNAIZ P, DORADO J

Grupo tec4AGR0 (Tecnologías Geoespaciales y de Precisión para una Agricultura Sostenible), Instituto de Ciencias Agrarias, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 28006 Madrid, España.

cesar@ica.csic.es, jmpena@ica.csic.es, phernaiz@ica.csic.es, jose.dorado@csic.es

Resumen: Este estudio a largo plazo llevado a cabo en Arganda del Rey (Madrid), compara tres estrategias de gestión de malas hierbas considerando aspectos agronómicos, económicos y ambientales. Las estrategias son: agricultura de conservación (CON), ecológica (ECO) y producción integrada (INT), ésta última como alternativa a las dos anteriores, promoviendo un uso juicioso de todas las herramientas disponibles, incluso herbicidas, para alcanzar unos objetivos definidos. Los resultados relativos a malas hierbas mostraron un escaso control de la especie principal, *Lolium rigidum*, en ECO. El máximo consumo de herbicidas y fertilizantes se registró en CON, en tanto que el mayor consumo de gasoil se produjo en ECO. El sistema INT mostró un comportamiento intermedio en todos los consumos, resultando la estrategia de mayor rentabilidad económica. La evaluación de externalidades (emisiones de CO₂, CFCs y consumos de energía, N y P) proporcionó valores igualmente intermedios en la estrategia INT.

Palabras clave: gestión de malas hierbas, evaluación multi-criterio, sistemas de producción, agricultura de conservación, agricultura ecológica, manejo integrado

1. Introducción

En la agricultura extensiva actual se han planteado dos estrategias de producción opuestas: *agricultura de conservación* y *agricultura ecológica*. La primera se centra principalmente en minimizar las alteraciones del suelo y todos sus efectos secundarios (erosión del suelo, producción de CO₂, coste económico, uso de energía). En tanto que la agricultura ecológica está fundamentalmente enfocada en evitar el uso de insumos externos (plaguicidas y fertilizantes), apoyándose en el uso de prácticas alternativas que favorecen la biodiversidad. Ninguna de las dos estrategias es la solución para una gestión sostenible de las malas hierbas. En sistemas que incluyen no-laboreo, el control está basado en un uso profiláctico de herbicidas, cuya presión de selección ha llevado a problemas de resistencia a los herbicidas (Powles & Yu, 2010). En la agricultura ecológica, un manejo de malas hierbas apoyado fundamentalmente en el laboreo también es difícil, costoso y, en ocasiones, no es muy eficaz (Benaragama et al. 2016).

Existe un enfoque intermedio a estas dos estrategias denominado *manejo integrado*, que propone la integración de ambos sistemas de producción; es decir, sin prohibir el uso de herbicidas, descarta cualquier tratamiento químico programado, combinando todas las estrategias posibles (preventivas, culturales, químicas y mecánicas) de forma racional, precisando la vigilancia permanente de la comunidad arvense (Jordan y Davis, 2015).

El objetivo principal planteado en este estudio era comparar, mediante una evaluación multi-criterio en base a criterios agronómicos, económicos y ambientales, los tres sistemas de cultivo, conservación, ecológico e integrado, haciendo especial hincapié en los resultados derivados de la gestión de las malas hierbas según la estrategia utilizada.

2. Material y Métodos

Este experimento de larga duración llevado a cabo en la finca “La Poveda” (Arganda del Rey, Madrid), es continuación del ya presentado por Dorado et al. (2017), cuyo diseño experimental era de bloques al azar con 4 repeticiones y un tamaño de parcelas individuales de 50 m × 21 m. Incluye tres sistemas de producción: *i*) Conservación (CON), un monocultivo de cebada que utiliza fertilizantes y herbicidas siguiendo las prácticas convencionales; *ii*) Ecológico (ECO), una rotación de 3 años de barbecho, guisante y cebada manejada siguiendo prácticas orgánicas; y *iii*) Integrado (INT), una rotación de 2 años de guisante con laboreo y cebada en no-laboreo, y bajos insumos de fertilizantes y herbicidas. Cada estrategia de producción tenía tres (en ECO), dos (en INT) y una (en CON) parcelas por bloque, incluyendo así todos los cultivos de la rotación cada año, con objeto de evitar la influencia del año climático.

En el año 2015 (año cero), todas las parcelas estuvieron sembradas de cebada manejada de forma convencional, comenzando los diferentes tratamientos en 2016. Durante el período 2015-2018, se ha llevado a cabo una monitorización de la densidad de malas hierbas prevalentes en la estación invierno-primavera, justo en el momento anterior a los tratamientos de control (aprox. marzo). Para ello, se utilizaron quince marcos de 0,1 m² en cada parcela siguiendo una malla regular de 10 m × 5 m, registrando el número de plántulas de cada especie. Los datos de producción de grano (cebada, guisante) se tomaron a finales de junio. Con objeto de comparar las diferentes medidas en el conjunto de años, se realizó un Análisis de la Varianza para Medidas Repetidas con dos factores, el tiempo (años) como factor intra-sujetos y la estrategia de cultivo como factor inter-sujetos. El análisis del efecto de las estrategias de gestión en cada año individualmente, se llevó a cabo con un Modelo Lineal General univariante. El contraste de medias se realizó con el test de Tukey B ($P < 0,05$). Además, se realizó un inventario detallado de todas las operaciones de campo y los insumos correspondientes a maquinaria, agroquímicos y combustible para cada sistema de producción. Estos datos fueron utilizados tanto en el análisis de rentabilidad como en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), una herramienta para la evaluación multi-criterio de todos los impactos asociados a cada sistema, contabilizando tanto el consumo de recursos como las emisiones (Brentrup 2004), con el software SimaPro 8.2.

3. Resultados y Discusión

3.1. Malas hierbas

La serie de datos registrada durante el período 2015-2018 ha mostrado una evolución diferente en las poblaciones de malas hierbas dominantes (*Lolium rigidum*, *Papaver rhoeas* y *Polygonum aviculare*) según la estrategia de gestión (Figura 1). En relación a *L. rigidum*, en 2016 las poblaciones de esta especie aumentaron drásticamente en cultivo de cebada en no-laboreo (CON e INT), siendo menor este crecimiento en cebada y guisantes con laboreo (ECO e INT). En cambio, en 2017 disminuyeron sustancialmente en los sistemas CON e INT, debido a la fuerte competencia del cultivo anterior de cebada, que tuvo un buen control tras el tratamiento diclofop-metil, y al bajo número de emergencias de *L. rigidum* en un otoño seco. Sin embargo, en ECO comenzó una evolución creciente de las poblaciones de *L. rigidum* que continuó en 2018, aparentemente debido a la escasa competencia del cultivo previo de guisantes y al pobre efecto de la grada de púas en cultivo de cebada, lo que favorece su crecimiento y producción de semillas el siguiente año.

En el caso de *P. rhoeas*, en 2016 sólo se observó un crecimiento de esta especie en parcelas de cebada en no-laboreo (CON e INT), coincidiendo con un otoño lluvioso. Del mismo modo, en 2017 las poblaciones de *P. rhoeas* aumentaron significativamente en cebada en no-laboreo después del guisante (INT), probablemente debido a que: el guisante no es muy competitivo, no se utilizó ningún herbicida específico para su control, y el no-laboreo puede favorecer a esta especie (Dorado y López-Fando, 2006). Esta tendencia se mantuvo en 2018, resultando la estrategia ECO la menos afectada en el conjunto de años estudiados.

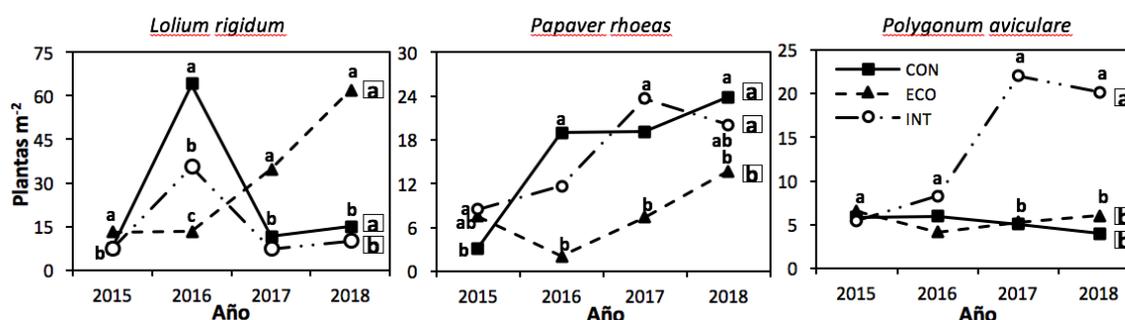


Fig. 1. Medias marginales estimadas de la densidad de plantas de *L. rigidum*, *P. rhoeas* y *P. aviculare* en los muestreos de invierno-primavera durante la serie temporal 2015-2018 para las estrategias CON (conservación), ECO (ecológica) e INT (integrada).

Las poblaciones de *P. convolvulus* permanecieron relativamente estables en 2016, incrementando significativamente su densidad a partir de 2017 en el sistema INT, fundamentalmente en parcelas de cebada en no-laboreo después de guisante. La baja competitividad del guisante, el no haber utilizado ningún herbicida específico, junto al

hecho de que el no-laboreo en cultivo de cebada puede favorecer el establecimiento de esta especie (Xans et al., 2011), explicarían este drástico incremento.

3.2. Rendimiento de los cultivos y rentabilidad económica

La productividad de los cultivos se vio afectada fundamentalmente por el régimen de lluvias registrado en cada estación. En invierno-primavera de 2016 se recogieron precipitaciones superiores a la media (344 mm enero-junio), resultando en rendimientos relativamente altos para la zona de estudio, sin diferencias significativas en ninguno de los sistemas (Figura 2). Por el contrario, 2017 fue un año muy seco (120 mm enero-junio), lo que provocó bajos rendimientos, especialmente en ECO, con valores significativamente inferiores que en los otros sistemas. En 2018 volvió a repetirse el patrón de 2016, con precipitaciones altas (294 mm de enero a junio), lo que ocasionó rendimientos también altos sin diferencias significativas entre los tres sistemas de cultivo.

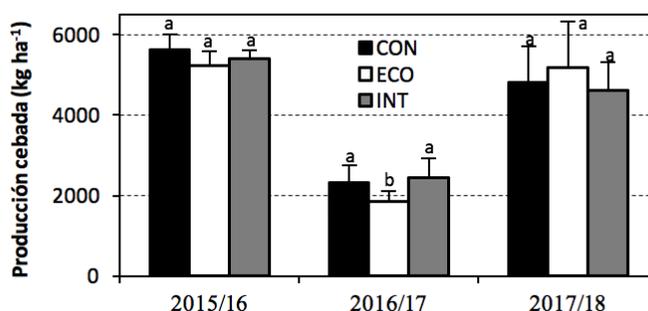


Fig. 2. Rendimiento del cultivo de cebada en las tres campañas estudiadas según las estrategias CON (conservación), ECO (ecológica) e INT (integrada).

En el análisis de la rentabilidad económica hubo tres factores que resultaron discriminantes en los resultados de las tres estrategias: laboreo, fertilizantes y herbicidas. Durante el periodo de estudio, el sistema CON registró solo dos operaciones de laboreo (36,4 L gasoil ha⁻¹), 6 operaciones en INT (84,4 L gasoil ha⁻¹), en tanto que ECO necesitó hasta 15 operaciones (158,6 L gasoil ha⁻¹). El número de aplicaciones fertilizantes realizadas en CON fueron 8 (326 kg N ha⁻¹ y 240 kg P y K ha⁻¹), en ECO no se utilizó fertilización nitrogenada, pero sí 4 aplicaciones de una fuente orgánica de P (180 kg ha⁻¹) y K (120 kg ha⁻¹), mientras que en INT solo se fertilizó una vez en primavera la cebada (198 kg N ha⁻¹). Finalmente, se registraron 13 aplicaciones herbicidas en el sistema CON (15,6 L gasoil ha⁻¹ + 158 L caldo ha⁻¹), 10 en INT (12 L ha⁻¹ de combustible + 132 L ha⁻¹ de caldo) y ninguna en ECO. Con estos datos, el cálculo del rendimiento neto obtenido en el conjunto de los tres años resultó favorable en INT respecto a las otras dos estrategias (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen del rendimiento neto, calculado como la diferencia entre beneficios brutos y costes de producción, obtenido cada año y en el conjunto de las tres campañas las estrategias CON (conservación), ECO (ecológica) e INT (integrada).

Estrategia	Rendimiento neto (€ ha ⁻¹)			
	2015/16	2016/17	2017/18	Suma tres campañas
CON	548	56	467	1071
ECO	361	-3	684	1042
INT	486	128	487	1101

3.3. Análisis de Ciclo de Vida

El análisis multi-criterio de las externalidades referidas tanto al consumo de recursos (energía, fertilizantes) como a las emisiones producidas (CO₂, CFCs) por hectárea, resultó claramente favorable a la estrategia ECO, con valores intermedios en INT (datos no mostrados). En cambio, cuando se refieren a tonelada de grano producida, las diferencias entre estrategias de gestión se atenuaron (Figura 3), destacando las mayores emisiones de CO₂ en CON, el mayor consumo de energía y mayores emisiones de CFC en ECO, y valores siempre intermedios en INT.

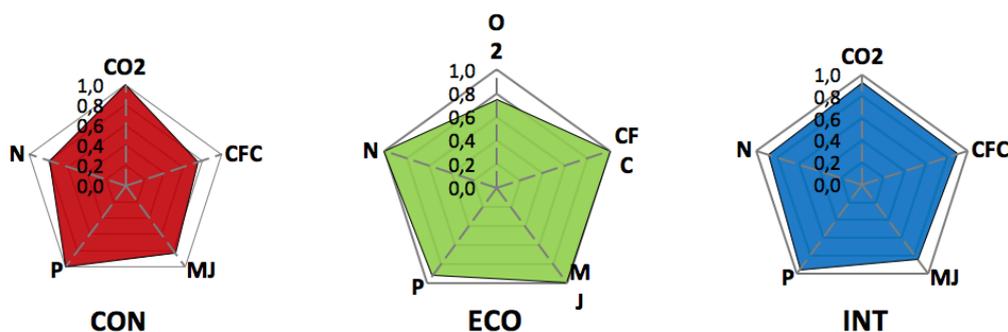


Fig. 3 Modelo de 12 años en un Análisis de Ciclo de Vida considerando los outputs (valores normalizados de: kg CO₂ eq., kg CFC⁻¹¹ eq., MJ, kg P eq., y kg N eq.) por tonelada de grano, para las estrategias CON (conservación), ECO (ecológica) e INT (integrada).

En resumen, cada especie de mala hierba se comportó de manera diferente en respuesta a la estrategia de gestión. El control de *L. rigidum* fue particularmente difícil en ECO, resultando mejor en el sistema INT. En cambio, el mejor control de *P. rhoeas* se obtuvo en el sistema ECO, y el peor control *P. aviculare* en el sistema INT. Considerando que la especie más problemática presente en este estudio en particular era *L. rigidum* (tanto por su densidad como por su competitividad con el cultivo), podemos concluir que el sistema INT proporcionó los mejores resultados generales. Por otro lado, el rendimiento neto obtenido en el periodo de estudio resultó también favorable en INT, un sistema que incluye una rotación de cultivos de 2 años (guisantes-cebada) y un uso racional de herbicidas y fertilizantes. El análisis de externalidades referidas a tonelada de cultivo confirmó unas emisiones y unos consumos también intermedios en INT respecto a los otros dos sistemas.

4. Agradecimientos

Trabajo financiado por AEI / FEDER, UE (proyecto AGL2017-83325-C4-1-R).

Referencias

Benaragama D, Shirtliffe SJ, Gossenb BD et al. 2016. Long-term weed dynamics and crop yields under diverse crop rotations in organic and conventional cropping systems in the Canadian prairies. *Field Crops Research* 196: 357-367.

Brentrup F, Kusters J, Lammel J et al. 2004. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology: 1. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. *European Journal of Agronomy* 20: 247-264.

Dorado J, López-Fando C 2006. The effect of tillage system and use of a paraplow on weed flora in a semiarid soil from central Spain. *Weed Research* 46, 424-431.

Dorado J, Andújar D, San Martín C, Martín JM, Campos D, Fernández-Quintanilla C 2017. Evaluación de los efectos del sistema combinado de pastos-cultivo sobre las malas hierbas. En: XVI Congreso SEMh (M Royuela, A Zabalza, eds), pp. 159-164, Edita UPN, Pamplona.

Jordan NR, Davis AS 2015. Middle-way strategies for sustainable intensification in agriculture. *BioScience* 65: 513-519.

Powles SB, Yu Q 2010. Evolution in action: Plant resistant to herbicides. *Annual Review of Plant Biology* 61: 317-347.

Xans FX, Berner A, Armengot L & Mäder P 2011. Tillage effects on weed communities in an organic Winter wheat-sunflower-spelt cropping sequence. *Weed Research* 51: 413-421.

Multi-criteria analysis of three weed management strategies in cereal crops

Summary: This long-term study carried out in Arganda del Rey (Madrid), compares three weed management strategies considering agronomic, economic and environmental aspects. The strategies are: conservation agriculture (CON), ecological agriculture (ECO) and integrated production (INT), the latter as an alternative to the previous two, promoting a judicious use of all available tools, including herbicides, to achieve defined objectives. The results for weeds showed little control of the main species, *Lolium rigidum*, in ECO. The maximum consumption of herbicides, fertilizers, seeds and energy was recorded in CON, while the highest consumption of diesel was in ECO. The INT system showed an intermediate behavior in all the consumptions, resulting in the strategy of greater economic profitability. The evaluation of externalities (emissions of CO₂ and CFC, and consumption of energy, N and P) provided also intermediate values in the INT strategy.

Keywords: weed management, multi-criteria assessment, production systems, conservation agriculture, ecological agriculture, integrated management.