

Efecto del cambio climático en cultivos herbáceos de secano

C. Lacasta¹, M.M. Moreno^{2,*}, C. Moreno² y R. Meco³

¹ Finca Experimental La Higuera, del Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Toledo, España

² Universidad de Castilla-La Mancha. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Ciudad Real, España

³ Servicio de Investigación de la Consejería de Agricultura de Castilla-La Mancha. Toledo, España

Resumen

Los cultivos herbáceos en ambientes mediterráneos de secano se enfrentan a un gran desafío por la pervivencia ante el cambio climático. La intensificación de los déficits hídricos y los eventos más frecuentes de alta temperatura durante finales de la primavera (abril-junio), coincidiendo con la etapa de llenado del grano de muchas especies, producen pérdidas medias continuas de rendimiento. En la Finca Experimental La Higuera (Toledo, España) ubicada en un entorno agrícola mediterráneo típico del secano español, se analiza cómo diferentes variables meteorológicas están afectando a los cultivos de cereal, garbanzo, girasol y veza en manejos convencional y ecológico. Para ello se han utilizado dos experimentos de larga duración (27 años), uno con manejo convencional y otro con ecológico, en los que se han ensayado cuatro rotaciones: Cebada-Cebada (C-C), Cebada-Garbanzo (C-GAR), Cebada-Girasol (C-GIR), Cebada-Veza forraje (C-VF).

Los resultados indicaron que las variables meteorológicas que han registrado un mayor aumento con el tiempo durante el periodo del ensayo son la temperatura media anual del año agrícola y las correspondientes a los meses estivales, siendo la precipitación registrada durante el mes de mayo, así como el periodo de heladas, las variables que más han disminuido. Los cultivos más afectados negativamente fueron el garbanzo y el girasol en ambos manejos y la cebada en ecológico, mientras que la veza forraje se vería favorecida en estas condiciones, especialmente en manejo ecológico, debido a su ciclo de cultivo.

Palabras clave: Cereal, garbanzo, girasol, veza forraje, fertilización, manejo ecológico.

Effect of climate change on rainfed herbaceous crops

Abstract

Herbaceous crops in Mediterranean dryland environments face a great challenge for survival in the scene of climate change. The intensification of water deficits and the most frequent high temperature events during the late spring (April-June), coinciding with the grain filling stage of many species, leads to continuous yield losses. In the Experimental Farm La Higuera (Toledo, Spain), located in a typical Mediterranean agricultural environment of the Spanish dry land, it is analyzed how different meteorological variables are affecting cereal, chickpea, sunflower and vetch crops under conventional and ecological management. For this purpose, two long-term experiments (27 years) have been carried out, con-

* Autor para correspondencia: martamaria.moreno@uclm.es

ventional end ecological managements, in which four crop rotations have been tested: Barley-Barley (CC), Barley-Chickpea (C-GAR), Barley -Sunflower (C-GIR), Barley-Vetch forage (C-VF).

The results indicated that the meteorological variables that have registered a greater increase over time during the trial period are the average annual temperature of the agricultural year and those corresponding to the summer months, with the precipitation recorded during the month of May, as well as the frost period, the variables that have suffered the highest decrease. The most negatively affected crops were chickpea and sunflower in both agricultural managements and barley in organic farming, while the forage vetch would be favored in these conditions, especially in ecological management, due to its cultivation period.

Keywords: Cereals, chickpea, sunflower, forage vetch, fertilization, ecological management.

Introducción

La principal variable a la que debe adaptarse la vida, y por tanto la agricultura que se desarrolla en una región, es el clima. La excepcionalidad del clima mediterráneo se basa en la coincidencia en el tiempo de las máximas temperaturas, y por tanto de la máxima evapotranspiración, con el de mínimas o nulas precipitaciones, lo que provoca un gran estrés hídrico estival al que deben adaptarse, en primera instancia, todos los ecosistemas. En el resto de ambientes, sin embargo, es común que las lluvias coincidan con los momentos térmicos más favorables para el desarrollo de las plantas. El privilegio del clima mediterráneo de contar con mejor dotación térmica, mayor intensidad de radiación y número de horas anuales de sol para producir biomasa vegetal, se encuentra en inferioridad de condiciones frente a los países del norte de Europa por no disponer del agua necesaria en el momento de mayor demanda.

Estos ambientes mediterráneos se enfrentan a un gran desafío por la pervivencia ante el cambio climático (Eigenbrode *et al.*, 2018). La intensificación prevista de los déficits hídricos y los eventos más frecuentes de alta temperatura durante finales de la primavera (abril-junio), coincidiendo con la etapa de llenado del grano de muchas especies, provocará pérdidas medias continuas de rendimiento (Asseng *et al.*, 2011). En este escenario de aumen-

to de déficits hídricos, los cultivos de primavera asociados a las rotaciones de cereales, como puede ser el garbanzo, guisante y girasol, es de prever que serán los que más sufrirán las consecuencias negativas (Koocheki *et al.*, 2006).

Sin duda la mayor vulnerabilidad ante el cambio climático lo presenta la agricultura de secano. Es esperable que el cambio climático aumente la variabilidad intra e interanual, alargando los períodos entre lluvias y los cambios espaciales y temporales en los patrones de precipitación, dificultando los esfuerzos para abordar los problemas de rendimientos crónicamente bajos y la alta volatilidad en los niveles de producción interanual, lo que conlleva un aumento de la pobreza, así como unas bajas tasas de desarrollo en las zonas de secano (Valverde *et al.*, 2015).

Hay coincidencia entre los autores en que, en las zonas cálidas y secas, los rendimientos se limitarán cada vez más por la disminución de la disponibilidad de agua y por el aumento de la temperatura, incrementando además la variabilidad del rendimiento durante las próximas décadas (Eitzinger *et al.*, 2013; Ray *et al.*, 2018). De igual forma, hay una gran incertidumbre de la respuesta al rendimiento por el clima cuando los estudios se regionalizan (Zhu *et al.*, 2019). Tanto estos autores como otros citados en sus estudios, coinciden en que el cambio climático es una amenaza

creíble y devastadora. Por ello proponen, con objeto de mantener la productividad de los cultivos en todo el mundo, realizar una gestión adaptativa que incluya, entre otras actuaciones, cambio de fechas de siembra de los cultivos, sustitución de cultivares y diversificación de los sistemas productivos con objeto de generar mayor biodiversidad y conseguir una mayor resiliencia de los sistemas agrarios de secano. Otra de las soluciones propuestas para minimizar la influencia del cambio climático en la productividad de los cultivos herbáceos de secano sería sembrar otros cereales o cultivos con mayor tolerancia a las nuevas condiciones (Wang et al., 2018).

El objetivo de este trabajo es determinar qué manejo se adapta mejor al nuevo escenario de cambio climático. Para ello se realizaron dos experimentos de larga duración (1992-2019) de diferentes rotaciones de dos hojas basadas en cultivo de cereal, uno con manejo ecológico y el otro con manejo convencional, utilizando los cultivos de cebada, garbanzo, girasol y veza forraje.

Material y métodos

Descripción de la zona de estudio

Los datos de este trabajo provienen de dos experimentos de larga duración, uno con manejo convencional y el otro con manejo ecológico. Ambos experimentos comprenden desde la campaña 1992/93 hasta la de 2018/19, teniendo por tanto una duración de 27 años (a lo largo del texto, cuando se alude al año 1993 se hace referencia a la campaña agrícola 1992/93, adoptándose este criterio en todos los años del ensayo). Dichos ensayos se realizaron en la Finca Experimental La Higuera, perteneciente al Museo Nacional de Ciencias Naturales del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), ubicada en Santa Olalla (Toledo, España) (40°3' N, 4°26'

W, 450 m s.n.m.). Ambos manejos difieren básicamente en que en el convencional se emplean agroquímicos, fertilizantes y herbicidas, mientras que en el ecológico no se realiza este tipo de aportes.

El suelo se clasifica como vertisol, de textura arcillosa uniforme, profundo, con una gran capacidad de retención de agua, difícil de trabajar dada su dispar consistencia en los grados extremos de humedad, con velocidad de infiltración pequeña y en el que los mecanismos de expansión y contracción superan las posibles consecuencias de la suela de labor.

Variables meteorológicas

Para definir el cambio climático en el periodo de estudio considerado, se analizó la evolución temporal de 37 variables meteorológicas: precipitaciones: anuales del año agrícola (septiembre a agosto), mensuales de enero a diciembre, de septiembre a marzo, de abril-mayo, de antes de la siembra otoñal, del verano anterior a la siembra otoñal (julio a septiembre); temperaturas: media anual del año agrícola (septiembre a agosto), medias mensuales de enero a diciembre, media de abril-mayo, media del verano (junio a septiembre), nº de días de mayo con $T^a > 30$ °C, nº de días de junio con $T^a > 30$ °C; heladas: nº de días de heladas en marzo, nº de días de heladas en abril y nº anual de días de helada.

Los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica ubicada en la finca, perteneciente a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), con el número 3358b.

Diseño experimental y técnicas de cultivo

Ambos experimentos, ecológico y convencional, se realizaron en la misma parcela agrícola con una separación de 50 metros y empleando el mismo diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticio-

nes. Se ensayaron cuatro rotaciones de cultivos basadas en el cultivo de cebada: cebada-veza forraje (C-VF), cebada-garbanzo (C-GAR), cebada-girasol (C-GIR) y monocultivo de cebada (C-C). Aunque el monocultivo no es una práctica considerada en agricultura ecológica, se ha incluido en este estudio a fin de comparar el comportamiento de este cultivo y manejo en las condiciones del ensayo. Las rotaciones fueron simultáneamente duplicadas para tener todas las fases de cada rotación presente cada año, alternando los dos cultivos de cada rotación en las mismas parcelas durante todo el ensayo.

Las parcelas elementales fueron de 400 m², si bien para los controles de producción no se tuvo en cuenta la franja perimetral de cada una de ellas a fin de evitar el efecto borde.

La labranza se realizó con cultivador, y la cosecha con mini cosechadora Hege (destinada a experimentos). La siembra y la recolección de los diferentes cultivares se llevaron a cabo en la misma fecha. Las épocas aproximadas de siembra y recolección de cada cultivo fueron noviembre y junio, respectivamente, para el cultivo de cebada, marzo y segunda quincena de julio para el garbanzo, abril y septiembre para el girasol, y noviembre y mayo para la veza forraje.

La densidad de siembra, en semillas m⁻², fue la misma para los dos manejos: 350 en cebada, 120 en veza y 50 en avena para el forraje, 40 en garbanzo y 4 en girasol.

Los cultivares de herbáceos ensayados han variado a lo largo del tiempo en función de la disponibilidad del mercado. Así, para cebada se han utilizado los cultivares «Hatif de Grignon», «Nuevede», «Reinette», «Volley» e «Icaria», para la veza forrajera, «Senda», «Filón» y «Del lugar», para el girasol, «Pereodovick», y para el garbanzo, «Castellano», «Eulalia» y «Amelia».

La fertilización en sementera consistió en todos los cultivos en 24-45-45 (N-P₂O₅-K₂O en kg/ha), realizándose en el caso de la cebada una aplicación adicional en cobertera, en el mes de febrero, de 66-0-0.

Los herbicidas empleados en las parcelas convencionales a lo largo de los 27 años han sido muy variados y han tenido por objeto mantener el cultivo lo más libre posible de malezas.

En todos los tratamientos y años del estudio, los residuos dejados por los cultivos fueron uniformemente distribuidos al final de cada ciclo en las mismas parcelas donde estaban implantados los cultivos. Si bien esta práctica no es muy común en agricultura convencional, se siguió, al igual que en las parcelas con manejo ecológico, a fin de evitar introducir una fuente externa de variación.

Tratamiento de los datos

El tratamiento de los datos consistió en un análisis descriptivo de los mismos, en un estudio bivalente para la analizar estadísticamente tanto la variación temporal de las correspondientes variables meteorológicas consideradas como la asociación entre el rendimiento de cada uno de los tratamientos estudiados con las variables meteorológicas seleccionadas (ambos basados en análisis de correlación), así como, en su caso, en la comparativa de rendimientos medios en el periodo de estudio (modelo mixto ANOVA considerando el año como factor de efectos aleatorios, y test de la Diferencia mínima significativa –*Least Significant Difference*, LSD–, para la separación de medias). Se fijó para estos análisis un nivel de significación $\alpha = 0,05$, utilizándose el software estadístico Infostat versión profesional 2017 para la implementación de los mismos. Las series gráficas se obtuvieron con Excel 2016 de Microsoft®.

Resultados y discusión

Variables meteorológicas

En la Tabla 1 se muestran las variables meteorológicas seleccionadas del conjunto de partida por presentar mayor variación con el tiempo en el período de estudio, elegidas en base al coeficiente de correlación Pearson (r) significativo ($\alpha = 0,05$) y superior, en valor absoluto, a 0,30, valor a partir del cual la asociación entre variables se puede considerar moderada (Martínez González et al., 2009).

Las variables meteorológicas que han registrado un mayor aumento con el tiempo durante el período del ensayo son la temperatura media anual del año agrícola (septiembre a agosto) y las temperaturas de los meses estivales, siendo la precipitación registrada durante el mes de mayo, así como número anual de días de helada, las variables que más han disminuido (Tabla 1). No obstante, en las Figuras 1 a 3 se ha representado la precipitación anual del año agrícola y la precipitación y la temperatura del mes de mayo.

Tabla 1. Variables meteorológicas con mayor variación temporal (años 1993-2019).
Table 1. Meteorological variables with greater temporal variation (years 1993-2019).

Variable meteorológica	Evolución temporal ⁽¹⁾	Variable meteorológica	Evolución temporal ⁽¹⁾	Variable meteorológica	Evolución temporal ⁽¹⁾
Prec. anual año agrícola ⁽²⁾	-	Tm año agrícola ⁽²⁾	++++	Tm ag	+++
Prec. sept-mar	-	Tm abr	+	Tm sept	++++
Prec. abr-may	-	Tm may	++	Tm jun, jul, ag, sept	++++
Prec. may	---	Tm abr-may	+	Tm oct	+++
Días heladas abr	--	Tm jun	+	Tm nov	+
Días heladas año	---	Tm jul	++	Días may TM > 30 °C	+

Prec.: Precipitación. Tm: Temperatura media. TM: Temperatura máxima.

⁽¹⁾ Basada en el coeficiente de correlación r ($|r| > 0,3$): +, - (signo de la correlación); $|r| = 0,31-0,40$: +, -; $|r| = 0,41-0,50$: ++, --; $|r| = 0,51-0,60$: +++, ---; $|r| > 0,60$: +++++, -----.

⁽²⁾ Año agrícola: sept-ag.

La Figura 1, relativa a la evolución de las precipitaciones a lo largo de los últimos 27 años agrícolas (1993-2019), muestra la variabilidad interanual de la pluviometría y una ligera tendencia descendente.

En relación a la precipitación registrada en el mes de mayo, en la Figura 2 se observa, además de una acusada variabilidad interanual,

un descenso a lo largo del tiempo más acusado que en el caso de la precipitación anual. Cabe destacar que, en 13 de los 27 años del estudio (48 %), se han registrado en este mes pluviometrías inferiores a 25 mm, de los cuales nueve se localizan en el período de los últimos 11 años (82 %). Esto indica la importante concentración de meses de mayo

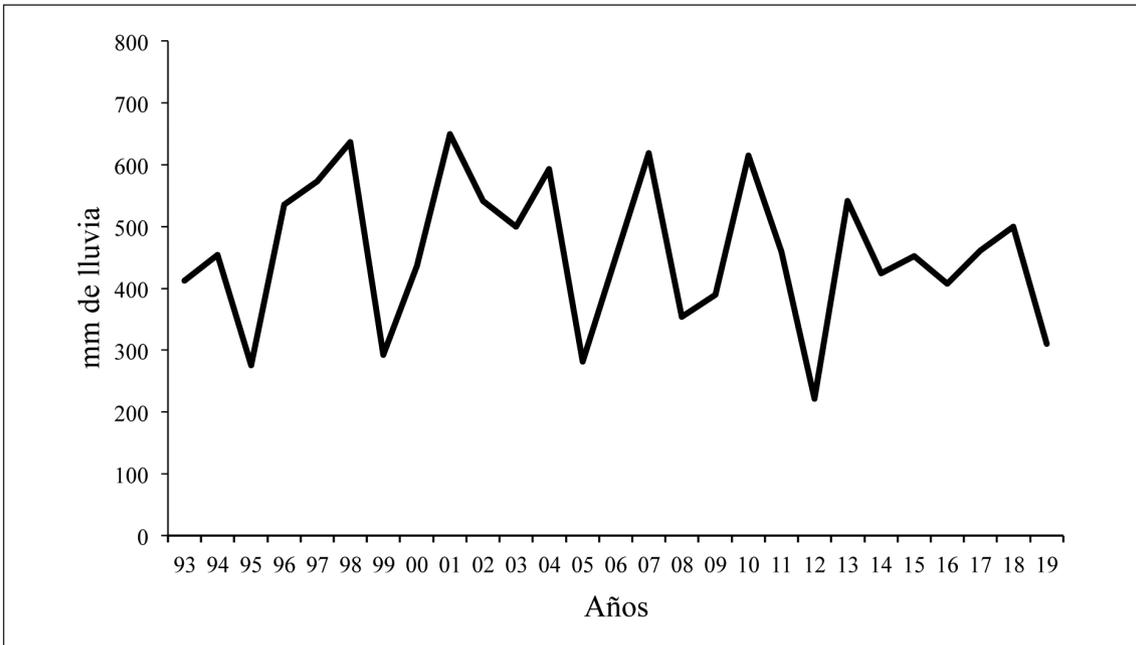


Figura 1. Evolución de las precipitaciones anuales (mm) a lo largo de los últimos 27 años (1993-2019).
Figure 1. Evolution of annual rainfall (mm) over the last 27 years (1993-2019).

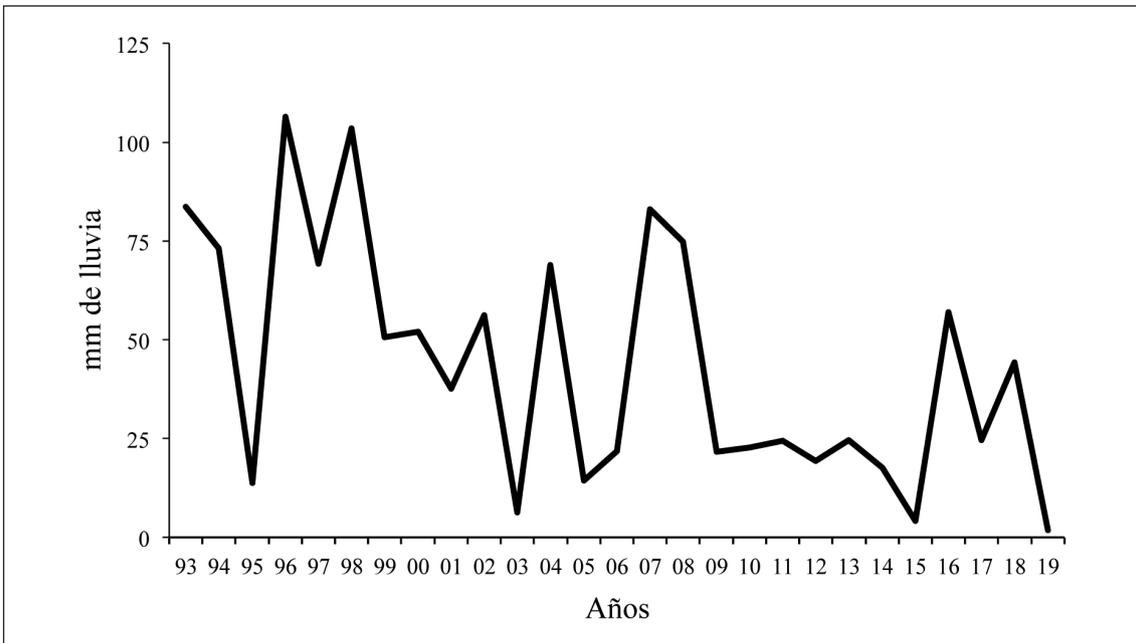


Figura 2. Evolución de las precipitaciones (mm) del mes de mayo a lo largo de los últimos 27 años (1993-2019).
Figure 2. Evolution of May rainfall (mm) over the last 27 years (1993-2019).

con bajas precipitaciones desde el año 2009, lo que, de continuar esta tendencia, podría condicionar la viabilidad de los cultivos de primavera-verano en condiciones de secano, como el garbanzo y el girasol.

La temperatura media del mes de mayo (Fig. 3) presentó una tendencia ascendente a lo largo del período de estudio. Concretamente, en la primera mitad de este período, el número de años con una temperatura media de este mes superior a 19 °C fue del 8 %, mientras que, en la segunda mitad, ascendió al 43 %, siendo la temperatura media en este segundo período de 1 °C más que en el primero.

Productividad de los cultivos y climatología

En la Figura 4 se aprecia la evolución del rendimiento de garbanzo en manejo convencional y ecológico en rotación con cebada, mostrando una clara tónica descendente en ambos casos. Concretamente, en la primera mitad del período de estudio, el rendimiento medio correspondiente al manejo convencional fue de 740 kg/ha, mientras que en la segunda mitad fue de 323 kg/ha, un 56 % inferior al obtenido en el primer período. En el manejo ecológico, los rendimientos medios para cada período fueron de 435 kg/ha y 209 kg/ha, respectivamente, un 52 % inferior para el segundo res-

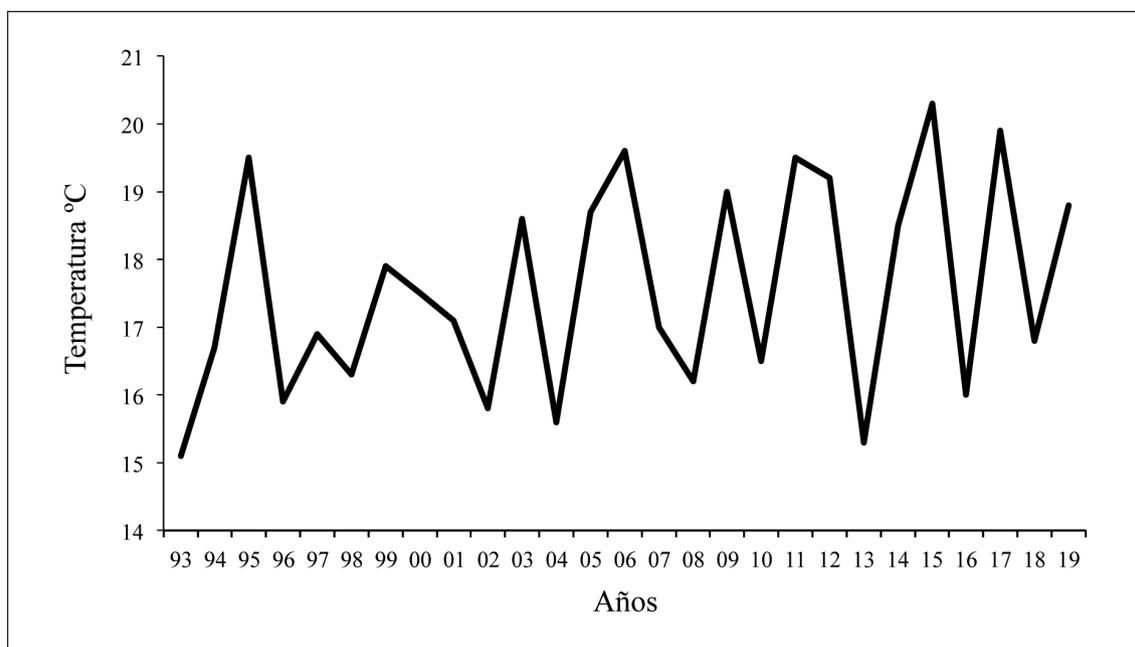


Figura 3. Evolución de las temperaturas medias del mes de mayo (°C) a lo largo de los últimos 27 años (1993-2019).

Figure 3. Evolution of mean temperature in May (°C) over the last 27 years (1993-2019).

pecto del primero. Ello indicaría que la disminución del rendimiento no se ve prácticamente afectada por el tipo de manejo. Este hecho es independiente de que la producción en

el manejo convencional, promediada a lo largo de los años, presentara diferencias estadísticamente significativas con la del manejo ecológico, superándola en un 64 %.

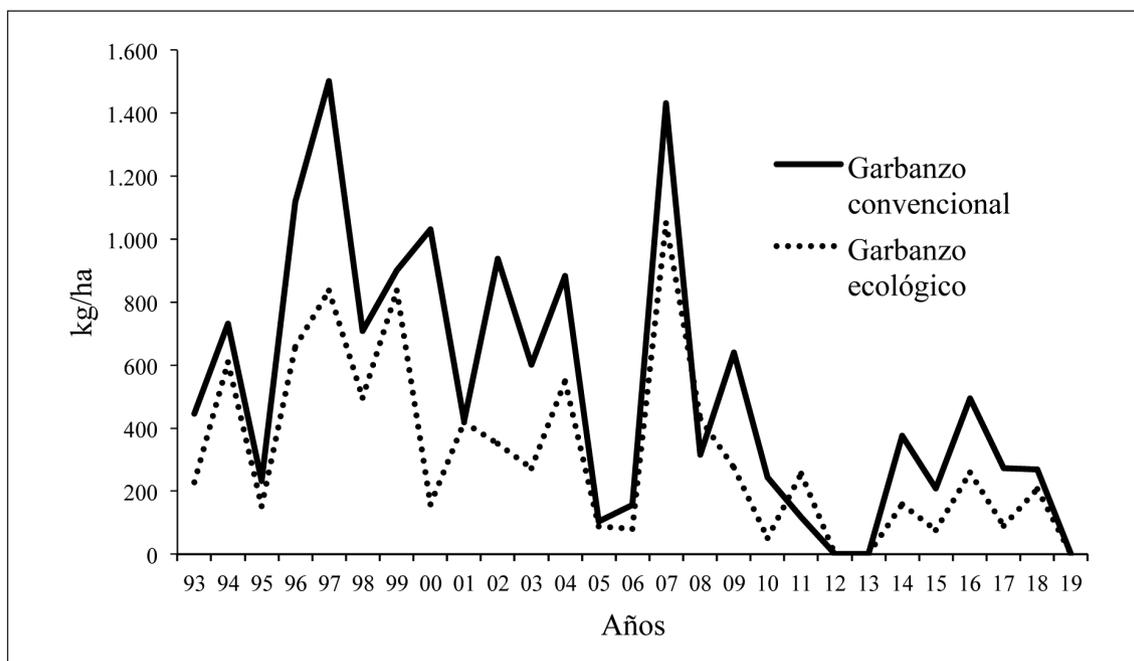


Figura 4. Evolución de los rendimientos de garbanzo en convencional y en ecológico en rotación con cebada.

Figure 4. Evolution of chickpea yields in rotation with barley in conventional and ecological agriculture.

En relación al cultivo de girasol en rotación con cebada (Fig. 5), la evolución de los rendimientos en ambos manejos es prácticamente coincidente, siendo las producciones medias en cultivo ecológico y convencional de 564 kg/ha y 584 kg/ha, respectivamente. En este caso, en la segunda mitad del período de estudio, se produjo en ambos manejos un descenso del 58 % respecto de la primera mitad.

En cuanto al rendimiento de veza forraje en rotación con cebada en manejo convencional y en ecológico (Fig. 6), se observa en ambos una evolución ascendente a lo largo del tiempo, siendo más acusada en el manejo ecológico, que en particular en la segunda mitad de este período experimentó un aumento de un 31 % respecto de la primera mitad, con un incremento del 18 % para el convencio-

nal. Los rendimientos medios de veza forraje obtenidos en el período de estudio en manejo convencional y ecológico fueron de 2804 kg/ha y 2395 kg/ha, respectivamente, diferencia probablemente debida al aporte de fertilización química en el manejo convencional (Moreno et al., 2011).

En las Figuras 7 y 8 se muestra, respectivamente, la evolución del rendimiento del cultivo de cebada en las distintas rotaciones ensayadas con manejo de cultivo convencional y ecológico.

En el manejo convencional, las producciones medias de cebada obtenidas en cada rotación fueron de 1155 kg/ha en monocultivo de cebada (C-C), 2084 kg/ha en C-GAR, 2403 kg/ha en C-GIR y 2198 kg/ha en C-VF (Tabla 2). En to-

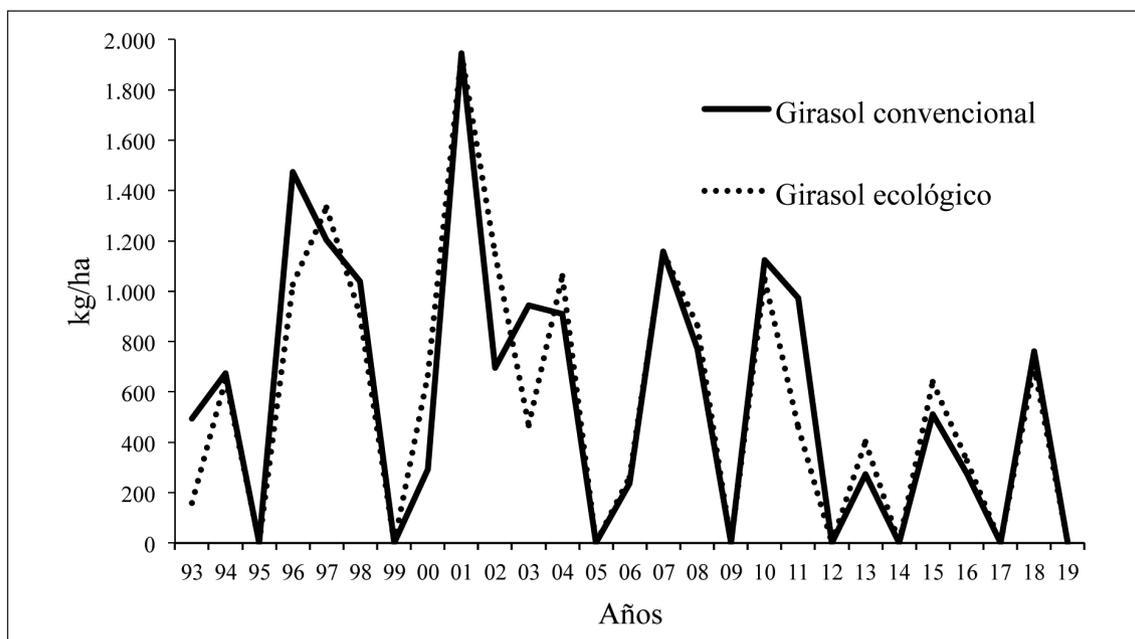


Figura 5. Evolución de los rendimientos de girasol en convencional y en ecológico en rotación con cebada.

Figure 5. Evolution of sunflower yields in rotation with barley in conventional and ecological agriculture.

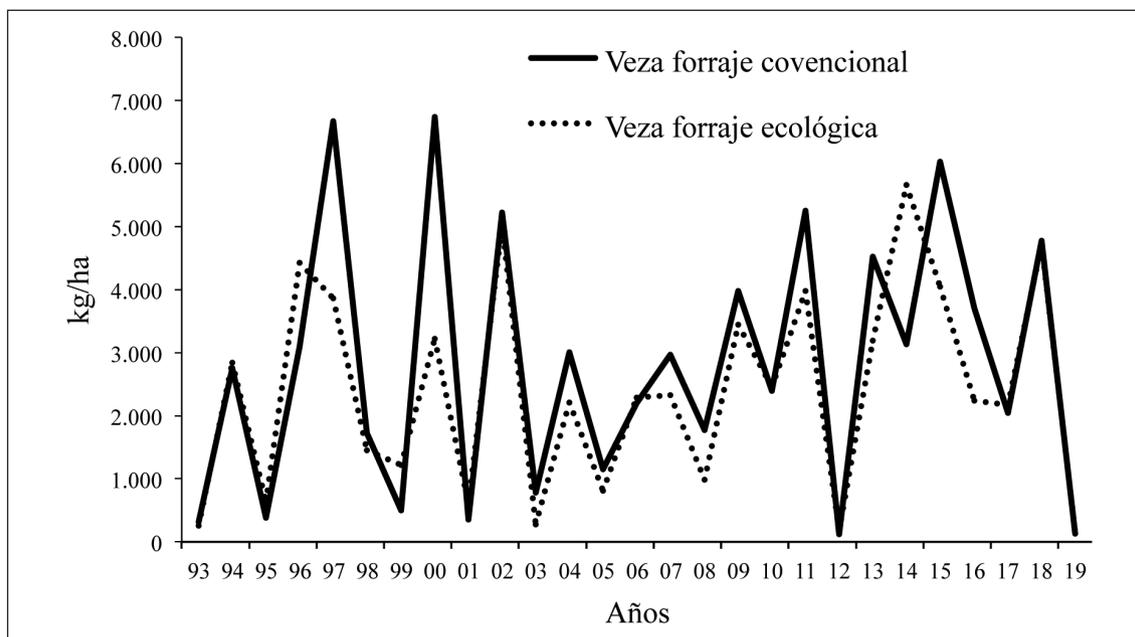


Figure 6. Evolución de los rendimientos de veza forraje en convencional y en ecológico en rotación con cebada.

Figure 6. Evolution of vetch forage yields in rotation with barley in conventional and ecological agriculture.

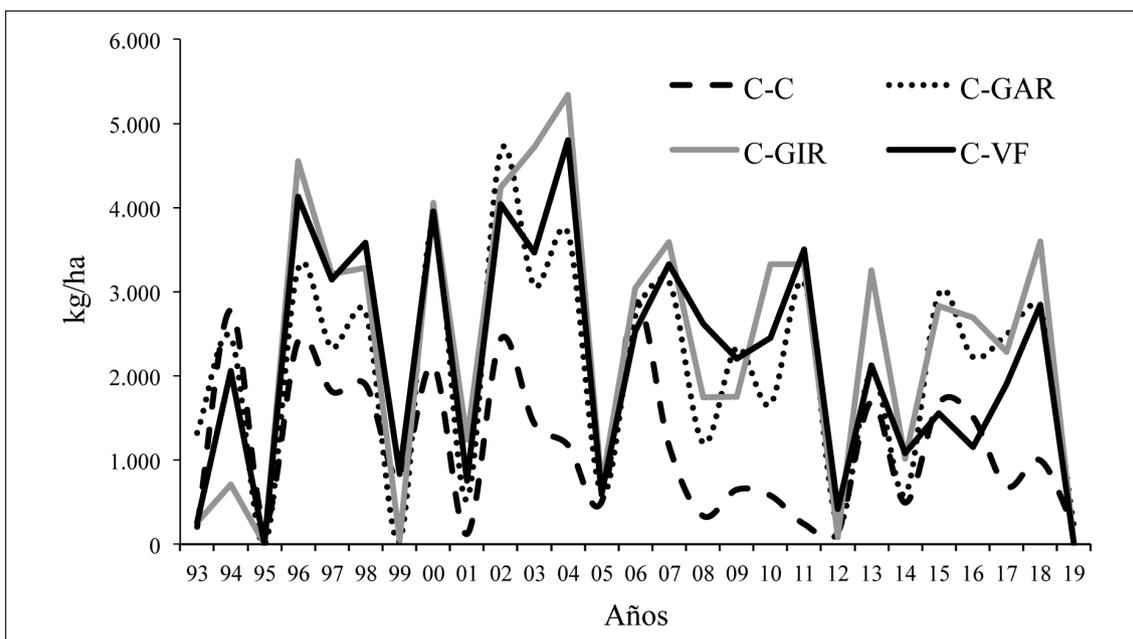


Figura 7. Evolución de los rendimientos de cebada en convencional en rotación con cebada (C-C), garbanzo (C-GAR), girasol (C-GIR) y veza forraje (C-VF).
 Figure 7. Evolution of barley yields in rotation with barley (C-C), chickpea (C-GAR), sunflower (C-GIR) and vetch forage (C-VF) in conventional agriculture.

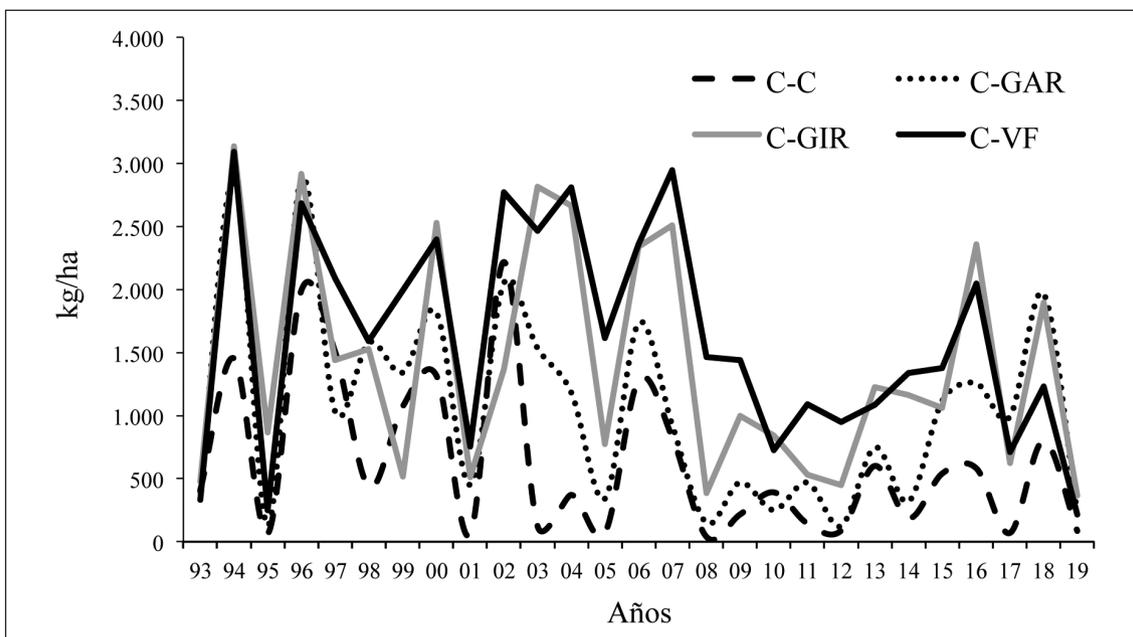


Figura 8. Evolución de los rendimientos de cebada en ecológico en rotación con cebada (C-C), garbanzo (C-GAR), girasol (C-GIR) y veza forraje (C-VF).
 Figure 8. Evolution of barley yields in rotation with barley (C-C), chickpea (C-GAR), sunflower (C-GIR) and vetch forage (C-VF) in ecological agriculture.

Tabla 2. Rendimiento de cebada (kg ha^{-1}) en diferentes rotaciones y manejos en el período de estudio (1993-2019).

Table 2. Barley yield (kg ha^{-1}) in different crop rotations and managements in the study period (1993-2019).

Rotación ⁽¹⁾	Manejo	
	Convencional	Ecológico
C-C	1155 b	628 C
C-GAR	2084 a	1051 B
C-GIR	2403 a	1418 A
C-VF	2198 a	1624 A

⁽¹⁾ Rotación: C-C: monocultivo de cebada; C-GAR: cebada-garbanzo; C-GIR: cebada-girasol; C-VF: cebada-veza forraje.

Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en el manejo convencional. Letras mayúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en el manejo ecológico (ANOVA y test LSD, $\alpha = 0,05$).

das las rotaciones se produjo una disminución de cosecha en la segunda mitad del período de estudio con respecto a la primera, siendo esta diferencia más acusada en el caso del monocultivo de cebada (C-C) (31 %).

En relación al manejo ecológico, las producciones medias de cebada obtenidas en cada rotación fueron inferiores a las alcanzadas en convencional, siendo de 628 kg/ha en C-C, 1051 kg/ha en C-GAR, 1418 kg/ha en C-GIR y 1624 kg/ha en C-VF (Tabla 2). Al igual que en el manejo convencional, en todas las rotaciones se produjo una disminución de cosecha en la segunda mitad del período ensayado con respecto a la primera, especialmente en C-C (51 %). Como puede observarse, estos rendimientos de los últimos años adoptan la forma de la gráfica correspondiente a las precipitaciones del mes de mayo (Fig. 2).

En la Tabla 2 se muestran los rendimientos medios de cebada (monocultivo y en rotación) relativos al periodo estudiado (1993-2019). Destaca el tratamiento C-C por sus rendimientos significativamente inferiores al resto en ambos manejos. En convencional se aprecia que el aumento de los rendimientos

de cereal se asocia a la rotación de cultivo y es indiferente del cultivo con el que rote. No ocurre lo mismo en el manejo ecológico, donde la falta de fertilización debe suplirse o bien con la mineralización de materia orgánica (C-GIR) o bien con cultivos que fijen nitrógeno y no sea empleado por el mismo (C-VF). Se pone de manifiesto que tanto en el manejo convencional como en ecológico es necesario hacer rotaciones de cultivo (independientemente de la especie), siendo además imprescindible la incorporación de leguminosas en el manejo ecológico.

En la Tabla 3 se relaciona el rendimiento de cada cultivo, en cada rotación y manejo, con las variables meteorológicas indicadas en la Tabla 1 que han mostrado una moderada-fuerte asociación con el rendimiento (correlación significativa, $\alpha = 0,05$, y coeficiente de correlación Pearson $|r| > 0,3$) y que podrían estar asociadas al cambio climático que se viene acusando en los últimos años en la zona de estudio.

En general, un aumento de la temperatura en los meses de mayo, junio y julio, ocasiona una disminución del rendimiento de los cul-

Tabla 3. Adaptación productiva al cambio climático de los cultivos ensayados en diferentes rotaciones y manejos ⁽¹⁾.Table 3. Productive adaptation to climate change of the crops tested in different crop rotations and managements ⁽¹⁾.

Manejo	Rotación ⁽²⁾	Cultivo ⁽³⁾	Prec. anual año agrícola ⁽⁴⁾	Prec. sept-mar	Prec. abr-may	Prec. may	Tm may	Tm jun	Tm jul
Convencional	C-C	C	+		+	+	-		
	C-GAR	C	+++	+	++	+	-		
		GAR	++		+++	++++	-	-	---
	C-GIR	C	++++	+++	+		-		
		GIR	++++	++++	+	++	--	-	--
	C-VF	C	++++	++	+++	++	-		
VF		+		+					
Ecológico	C-C	C			++	++	-		--
	C-GAR	C	+		+	++	-		
		GAR	+		++	++++	-	-	--
	C-GIR	C	+	+	+	+	-		
		GIR	++++	++++	++	++	---	-	--
	C-VF	C	+		++	++	-		
VF		+	+			+			

Prec.: Precipitación. Tm: Temperatura media. TM: Temperatura máxima.

⁽¹⁾ Basada en el coeficiente de correlación r ($|r| > 0,3$): +, - (signo de la correlación); $|r| = 0,31-0,40$: +, -; $|r| = 0,41-0,50$: ++, --; $|r| = 0,51-0,60$: +++, ---; $|r| > 0,60$: + + + +, - - - -.⁽²⁾ Rotación: C-C: monocultivo de cebada; C-GAR: cebada-garbanzo; C-GIR: cebada-girasol; C-VF: cebada-veza forraje.⁽³⁾ Cultivo: C: cebada; GAR: garbanzo; GIR: girasol; VF: veza forraje.

tivos de primavera-verano como garbanzo y girasol, tanto en el manejo ecológico como en el convencional. Este efecto es más acusado con las temperaturas estivales (julio), y especialmente en el cultivo de garbanzo con manejo convencional (- - -). Sin embargo, para ambos cultivos y manejos, las variables meteorológicas de mayor incidencia son las relativas a la precipitación, destacando en

particular la correspondiente al mes de mayo (+ + + + y + +) en garbanzo y girasol, respectivamente).

Por otra parte, en el cultivo de girasol, al tener un sistema radicular pivotante y ser muy eficiente en situación de estrés hídrico, unido al hecho de desarrollarse los experimentos en un vertisol con una gran capacidad de retención de agua (160 mm), sus rendimientos

están muy relacionados con las precipitaciones registradas en otoño-invierno, independientemente del manejo utilizado (+ + + +).

El descenso productivo de garbanzo y girasol en el período de estudio, comentado anteriormente y reflejado en las Figuras 4 y 5, obedecería a la fuerte dependencia de estos cultivos con las variables meteorológicas relativas a la precipitación y a las temperaturas registradas en mayo y julio, especialmente, y al hecho de que estas variables hayan disminuido y aumentando, respectivamente, en el período de estudio (Fig. 1 a 3).

En relación a la veza para forraje (VF), al ser cosechada a primeros de mayo, las variables meteorológicas de disminución de precipitación prácticamente no tienen efecto sobre la producción del cultivo (Tabla 3), mientras que el aumento de temperatura del mes de mayo afectaría de modo positivo al manejo ecológico, ya que la fenología de los cultivos con este manejo se retrasa unos días con respecto al convencional, posiblemente debido al no aporte de fertilización mineral.

La cebada en rotación convencional tiene una correlación muy superior (+ + + y + + + +) con la pluviometría anual que las rotaciones ecológicas (+). La disponibilidad de agua permite que la fertilización química pueda expresarse, mientras que, en el manejo ecológico, la producción de biomasa depende de la disponibilidad de nutrientes y de la fenología, siendo mayor desde el encañado al espigado. La diferencia del comportamiento de los dos manejos con respecto a la productividad de la cebada en rotación (no monocultivo) se debe a que en el manejo convencional se correlaciona con las precipitaciones de otoño e invierno y especialmente con las anuales (+ + + y + + + +), mientras el manejo ecológico está más relacionado con las precipitaciones del mes de mayo (+ y + +).

Con respecto a estas precipitaciones primaverales, en ambos manejos se produce un

aumento del rendimiento de la cebada en rotación, especialmente en el caso C-VF, debido a la mayor disponibilidad de nitrógeno en el suelo suministrado por el cultivo de la veza (+ + + en convencional, + + en ecológico). Esto explicaría la buena respuesta productiva de la cebada en la rotación C-VF (1624 kg/ha) en ecológico (Tabla 2).

Se ha observado que el manejo ecológico tiene un desarrollo más lento que el convencional, por lo que la disminución de las precipitaciones en el mes de mayo aumenta las diferencias en los rendimientos de cebada entre manejo convencional y ecológico en sentido inverso a la precipitación registrada ese mes (Tabla 3). Esto determinaría que el cambio climático pudiera estar afectando más a la cebada con manejo ecológico que con convencional.

El monocultivo de cebada tiene bajas correlaciones con las variables meteorológicas estudiadas. Así, los rendimientos de este manejo estarían relacionados con el secuestro de nitrógeno por una mayor actividad biológica en el suelo al tener todos los años una incorporación de la paja del cereal, mientras que, en las otras rotaciones, la alternancia de cultivos permite que ésta sea mineralizada durante el ciclo del siguiente cultivo.

En general, las variaciones en la temperatura media de la estación de crecimiento en ± 2 °C podría suponer una reducción sustancial en el grano producido de hasta en un 50 %, suponiendo cada grado de calentamiento una reducción de entre el 10 % y el 15 % de la producción de cereal. Las temperaturas elevadas rebajan más el rendimiento que las temperaturas bajas, de forma que los rendimientos de los cereales decaen aún más rápido a medida que aumenta la temperatura (Asseng et al., 2011). Estos mismos autores, utilizando modelos de previsión, obtuvieron pérdidas medias continuas de rendimiento de un 14 % en los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5 (*Representative Concentration Pathway*)

para 2021-2050 y de un 17 % (RCP 4,5) o un 27 % (RCP 8,5) para 2051-2080, también acompañados de un aumento de las variabilidades del rendimiento. En otras palabras, los modelos prevén una disminución de los rendimientos debido a una mayor intensificación de los déficits hídricos y a los eventos más frecuentes de altas temperaturas en los finales de las primaveras (abril-junio).

Una posible alternativa para salvar el déficit de mayo sería un adelantamiento de las siembras o bien cultivares de ciclo corto sembrados en otoño (Eigenbrode *et al.*, 2018), pero, en ambos casos, existen riesgos, como puede ser un aumento de malas hierbas o el hecho de que la floración se adelante a febrero, cuando aún hay posibilidad de heladas. El uso de cultivares de ciclo corto revela mayores ganancias de rendimiento (26-38 %) que las siembras tempranas (6-10 %), ya que se adelanta con éxito la aparición de la antesis y el período de llenado del grano, lo que reduce o evita los riesgos de exposición a mayor sequía y estrés térmico a finales de la primavera (Eigenbrode *et al.*, 2018). Por el contrario, el calentamiento invernal durante la siembra temprana podría afectar el cumplimiento de la vernalización al ralentizar la acumulación de horas frío, aumentando así la duración del crecimiento de la pre-antesis (Yang *et al.*, 2019). En este sentido, el estudio realizado por Bouras *et al.* (2019) pone de manifiesto que, cuando se analiza la duración de las principales etapas fenológicas del trigo en función del enfoque de grado-día, el aumento de la temperatura del aire provoca un acortamiento del ciclo de desarrollo de hasta 50 días, provocando una disminución en los rendimientos entre un 7 % y un 30 %. Asimismo, estos autores consideran que las necesidades de agua disminuirán entre un 13 % y un 42 %, principalmente en respuesta al acortamiento del ciclo.

Otra línea de investigación es que el aumento de CO₂ en la atmósfera podría contrarres-

tar las pérdidas de rendimiento. Una característica de los ambientes mediterráneos es que la evolución de la producción de grano toma una forma de diente de sierra por su dependencia de la pluviometría; por ello, consideramos que el efecto fertilizante del aumento de CO₂, si existe, sería inapreciable.

Por todo ello, la actuación de una región ante el cambio climático debería sustentarse en el análisis de las diferentes prácticas agrícolas que puedan mitigar los efectos de la sequía, así como en la utilización de variedades más tempranas en las que el período de mayor demanda hídrica sea anterior a los previsibles períodos de sequía, al igual que argumentan Radzka *et al.* (2019).

Conclusiones

Las variables meteorológicas que han registrado un mayor aumento con el tiempo durante el período del ensayo son la temperatura media anual del año agrícola y las temperaturas estivales, siendo la precipitación registrada durante el mes de mayo, así como el número anual de días de helada, las variables que más han disminuido.

Los rendimientos de garbanzo y girasol se ven perjudicados tanto en manejo convencional como en ecológico por el cambio climático, especialmente por el descenso en las precipitaciones, en particular las correspondientes al mes de mayo, lo que podría hacer inviable económicamente a estos cultivos.

La veza forraje no se ve afectada por el descenso de la precipitación de mayo debido a su fecha de cosecha (recolección anterior a que tenga efecto el déficit hídrico). Adicionalmente, el aumento de rendimiento es mayor en manejo ecológico que en convencional debido a que podría verse más favorecido por el incremento de las temperaturas en el mes de mayo.

La disminución de cosecha del manejo ecológico frente al convencional está principalmente causada por la falta de fertilización química, estando esta disminución de cosecha más afectada por el adelanto del déficit hídrico y el retraso fenológico asociado a este manejo.

La posible adaptación de los cultivos al cambio climático debería sustentarse en el análisis de diferentes prácticas agrícolas que puedan mitigar sus efectos y la utilización de variedades más tempranas cuyo período de mayores necesidades hídricas sea anterior a los previsibles períodos de sequía.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Servicio de Investigación de la Consejería de Agricultura de Castilla-La Mancha por la financiación de los experimentos de larga duración que se realizan en la finca experimental "La Higuera" desde 1983, así como a José María Gómez Camacho y a Gregorio Gómez, por su dedicación a los trabajos experimentales de campo.

Referencias bibliográficas

- Asseng S, Foster I, Turner NC (2011). The impact of temperature variability on wheat yields. *Global Change Biology* 17: 997-1012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02262.x>
- Bouras H, Jarlan L, Khabba S, Er-Raki S, Dezetter A, Sghir F, Trambly Y (2019). Assessing the impact of global climate changes on irrigated wheat yields and water requirements in a semi-arid environment of Morocco. *Scientific Reports* 9: 19142. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55251-2>
- Eigenbrode SD, Binns WP, Huggins DR (2018). Confronting climate change. Challenges to dryland cereal production: A call for collaborative trans-disciplinary research, and producer engagement. *Frontiers in Ecology and Evolution* 5: 164. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00164>
- Eitzinger J, Trnka M, Semerádová D, Thaler S, Semerádová E, Hlavinka P, Šiška B, Takáč J, Malatinská L, Nováková M, Dubrovský M, Žalud Z (2013). Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe – hotspots, regional differences and common trends. *The Journal of Agricultural Science* 151: 787-812. <https://doi.org/10.1017/S0021859612000767>
- Koocheki A, Nassiri M, Soltani A, Sharifi H, Ghorbani R (2006). Effects of climate change on growth criteria and yield of sunflower and chickpea crops in Iran. *Climate Research* 30: 247-253. <https://doi.org/10.3354/cr030247>
- Martínez González MA, Sánchez-Villegas A, Faullín Fajardo J (2009). *Bioestadística amigable 2ª Ed.* Díaz de Santos. Madrid.
- Moreno M, Lacasta C, Meco R, Moreno C (2011). Rainfed crop energy balance of different farming systems and crop rotations in a semi-arid environment: Results of a long-term trial. *Soil and Tillage Research* 114: 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.03.006>
- Radzka E, Jankowski K, Jankoska J (2019). Effects of rainfall shortage and climate water balance change on agriculture. *Applied ecology and environmental research* 17(4): 7667-7678. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1704_76677678
- Ray RL, Fares A, Risch E (2018). Effects of Drought on Crop Production and Cropping Areas in Texas. *Agricultural & Environmental Letters* 3: 1-5. <https://doi.org/10.2134/ael2017.11.0037>
- Valverde P, Carvalho M, Serralheiro R, Maia R, Ramos V, Oliveira B (2015). Climate change impacts on rainfed agriculture in the Guadiana river basin (Portugal) *Agricultural Water Management* 150: 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.11.008>
- Wang J, Kranthi S, Saxena R, Orsat V, Raghavan V (2018). Effect of climate change on the yield of cereal crops: A Review. *Climate* 6: 41 <https://doi.org/10.3390/cli6020041>

Yang Ch, Fraga H, Van Leperen W, Trindade H, Santos JA (2019). Effects of climate change and adaptation options on winter wheat yield under rainfed Mediterranean conditions in southern Portugal. *Climatic Change* 154: 159-178. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02419-4>

Zhu X, Troy T, Devineni N (2019). Stochastically modeling the projected impacts of climate change on rainfed and irrigated US crop yields. *Environmental Research Letters* 14: 074021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab25a1>

(Aceptado para publicación el 19 de octubre de 2020)