

Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

Escuela para Graduados

**PATRONES DE ABSORCIÓN Y EFICIENCIA DE USO DEL
AGUA DE CULTIVOS INVERNALES EN EL CENTRO DE
CÓRDOBA**

ALFREDO ANÍBAL TULA

Trabajo Final

para optar al Grado Académico de

Especialista en Producción de Cultivos Extensivos

Córdoba - 2019

PATRONES DE ABSORCIÓN Y EFICIENCIA DE USO DEL AGUA DE CULTIVOS INVERNALES EN EL CENTRO DE CÓRDOBA

Tula Alfredo Aníbal

Director: Dr., MSc. Ing. Agr. Cantarero Marcelo Gabriel.

Tribunal Evaluador del Trabajo Final

MSc. Ing. Agr. Salvador Prieto Angueira

MSc. Ing. Agr. Ignacio Severina

Esp.Ing. Agr. Adriana Rollan

Presentación Formal Académica

6 de noviembre de 2019.

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Córdoba



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

Agradecimientos

A mí Director, Marcelo Cantarero, por brindarme el tema de investigación y las herramientas necesarias para estudiarlo. Además por su paciencia y confianza, mi más profundo agradecimiento.

A la comisión revisora por su tarea y los aportes realizados en la corrección de este trabajo: MSc. Ing. Agr. Salvador Prieto Angueira, MSc. Ing. Agr. Ignacio Severina y Esp.Ing. Agr. Adriana Rollan y al director de la escuela de posgrado Dr. Ing. Agr. Omar Bachmeier.

A mis compañeros de cátedra de Cereales y Oleaginosas de la facultad de ciencias agropecuarias. También al Dr. Pablo Abatte que hizo importantes aportes.

A la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba por facilitar el desarrollo de posgrado de su personal.

PATRONES DE ABSORCIÓN Y EFICIENCIA DE USO DEL AGUA DE CULTIVOS INVERNALES EN EL CENTRO DE CÓRDOBA.

RESUMEN

En Córdoba se condujo un experimento para evaluar la estrategia de absorción de agua, el consumo y eficiencia de uso del agua (EUA) de seis especies invernales (trigo, triticale, cártamo, colza, arveja, y garbanzo) en un suelo *Haplustol típico* de textura franco limosa. Las estrategias de cada especie fueron caracterizadas a través de: i) la velocidad de avance del frente de absorción radical (VA), ii) la profundidad máxima de enraizamiento (PE) y iii) la tasa de absorción diaria de agua (TA). Las variables fueron calculadas a partir de mediciones periódicas del contenido de agua en el suelo hasta los 260 cm de profundidad, partiendo de un perfil bien provisto de humedad y bajo las condiciones de escasa oferta hídrica que caracterizan al ambiente del centro de Córdoba. La VA varió desde 1,8 a 3,5 cm día⁻¹ para arveja y triticale, respectivamente. La PE se alcanzó en todas las especies entre floración y mediados del período de llenado del grano, la misma varió desde 160 cm para arveja a más de 260 cm para cártamo. La TA promedio, para el estrato 40–160 cm de suelo, estuvo entre 0,012 d⁻¹ para arveja y 0,043 d⁻¹ para colza y 0,045 d⁻¹ para trigo. El cártamo presentó mayores TA por debajo de los 140 cm, lo que permitió agotar el agua útil hasta la profundidad de medición. Los cultivos de mayor rendimiento fueron el cártamo, triticale y garbanzo, siendo estos dos últimos los de mayor EUA.

Palabras clave: Cultivos invernales, estrategia de absorción de agua, eficiencia de uso del agua.

PATTERNS OF ABSORPTION AND WATER USE EFFICIENCY OF CROP WINTER IN THE CENTER OF CORDOBA

ABSTRACT

In the 2011 an experiment was conducted in Córdoba to evaluate the strategy of water absorption and water use and water use efficiency from six winter species (wheat, triticale, canola, peas, chickpeas and safflower) in a in a soil silty loam Entic Haplustoll. The differences in the strategies of each species were characterized by: I) the speed of advance of the front of radical absorption (VA), II) the maximum apparent depth of rooting (PE) and III) the daily rate of water absorption (TA). Besides consumption and water use efficiency for each species was evaluated. The variables were calculated from periodic measurements of water content in the soil to 260 cm depth, from a well-stocked moisture profile and under conditions of limited water supply. The VA ranged from 1,8 to 3.5 cm day⁻¹ for pea, and triticale, respectively. The PE was achieved in all species between mid-flowering and grain filling period, it ranged from 160 cm to pea more than 260 cm for safflower. The TA average for stratum 40-160 cm soil ranged from 0.012 d⁻¹ for pea and 0.043 d⁻¹ and 0.045 d⁻¹ rape 1to wheat. Safflower had higher TA below 140 cm, allowing exhaust the available water to the depth of measurement. The cultures were higher yielding safflower, triticale and chickpea, the latter two the most EUA.

Keywords: Winter crops, water absorption strategy, water use efficiency.

TABLA DE CONTENIDOS

Descripción	Pág.
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE SIGLAS O ABREVIATURAS	XII
INTRODUCCIÓN	1
HIPOTESIS	8
OBJETIVO GENERAL	8
OBJETIVOS ESPECIFICOS	8
MATERIALES Y MÉTODOS	9
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
Caracterización agrometeorológica	13
Fenología	14
Contenido de agua en el suelo al momento de siembra y precipitaciones ocurridas durante el ciclo para cada especie	15
Velocidad de avance del frente de extracción radical	17
Profundidad máxima de enraizamiento	19
Tasa de absorción de agua de las raíces	20
Variación en el contenido de agua útil del suelo y su consumo	24
Peso seco del cultivo, rendimiento y eficiencia de uso de la radiación y agua	29
Peso seco del cultivo, radiación interceptada y eficiencia de uso de la	29

radiación	
Rendimiento e índice de cosecha	32
Eficiencia de uso del agua	32
CONCLUSIÓN	35
BIBLIOGRAFÍA	37

LISTA DE TABLAS

Tabla	Título	Pág.
1	Propiedades del suelo correspondientes al sitio experimental	9
2	Composición química del grano de cada especie, valores porcentuales de hidratos de carbono (HC), proteínas (Prot) y lípidos (Lip).	13
3	Valores mensuales de temperatura media (T_{med} ; °C), precipitación (PP; mm) y evapotranspiración de referencia (ET_0 ; mm) y nivel de deficiencia ($PP-ET_0$) durante la estación de crecimiento de los cultivos para el año 2011 y valores históricos (período 1966 - 1996).	14
4	Especies, cultivar, fechas de siembra, floración y madurez fisiológica y días desde siembra a floración (S-F), floración a madurez (F-M) y siembra a madurez (S-M).	15
5	Precipitación (PP) y precipitación efectiva (PEf) acumuladas para los períodos de Siembra – Floración, Floración – Madurez y Siembra – Madurez. Los valores de PEf fueron calculados según la Ec. 4 (Dardanelli et al., 1992).	17
6	Velocidad de avance del frente de absorción radical (VA), profundidad máxima de enraizamiento (PE) y la tasa de absorción de agua (TA) para este estudio.	20
7	Velocidad de avance del frente de absorción radical (VA), profundidad máxima de enraizamiento (PE) y la tasa de absorción de agua (TA) realizado por Cantarero <i>et.al.</i> , (2008) en trigo en el campo escuela de la facultad de agronomía – UNC y por Dardanelli <i>et.al.</i> , (1997) en EEA INTA Manfredi.	22
8	Agua útil (AU), tasa de absorción (TA), absorción diaria potencial (Absorción Potencial), demanda atmosférica diaria (ET_0) y consumo diario (ET_c).	22
9	Peso seco total del cultivo a madurez (PST); radiación fotosintéticamente	30

activa interceptada acumulada a madurez fisiológica (IRFA); eficiencia de uso de la radiación (EUR); consumo acumulado de agua (C), eficiencia de uso del agua expresada en función del peso seco total del cultivo (EUA_{PST}), rendimiento en grano (0% de humedad; RG); índice de cosecha (IC), eficiencia de uso del agua expresada en función del rendimiento en grano (EUA_{RG}) y en términos del costo energético del grano (EUA_{RGgl}) para cada especie.

- 10 Variación porcentual respecto al mayor valor de cada variable (100%) para cada especie. Ciclo desde siembra a madurez (Ciclo), velocidad de avance del frente radical (VA), profundidad máxima de enraizamiento (PE), tasa de absorción de agua (TA), consumo total de agua (C), agua útil residual a madurez (AU residual), radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada a madurez (IRFA), eficiencia de uso de la radiación (EUR), peso seco total del cultivo a madurez (PST), rendimiento en grano (RG), eficiencia de uso del agua para peso seco total (EUA_{PST}), eficiencia de uso del agua para rendimiento (EUA_{RG}) y eficiencia de uso del agua de acuerdo al costo energético del rendimiento (EUA_{RGgl}). 34
-

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Pág.
1	Área cosechada, rendimiento y producción del Garbanzo en la provincia de Córdoba (Fuente: Bolsa de Cereales de Córdoba, 2017).	2
2	Área cosechada, rendimiento, producción y relación entre la producción y el área cosechada de cártamo en la Argentina, para la serie histórica 1969-2017 (Estimaciones Agrícolas, 2017).	4
3	Área sembrada (a), rendimiento (b), producción (c) y relación entre producción y superficie sembrada (d) de Colza en Argentina (Fuente: Estimaciones agrícolas, 2017).	5
4	Humedad volumétrica hasta 2,60 m de profundidad del suelo al inicio del experimento (Inicio), punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de campo (CC)	16
5	Profundidad aparente de las raíces en función de los días desde la siembra y del tiempo térmico para Arveja (círculos vacíos), Garbanzo (círculos llenos), Trigo (triángulos vacíos), Triticale (triángulos llenos), Cártamo (rombos vacíos), Colza (rombos llenos). Las pendientes de las rectas de ajuste representan la velocidad de profundización de las raíces (VA).	18
6	Tasa de extracción para los cultivos de Trigo, Triticale, Colza, Garbanzo, Cártamo y Arveja en función de la profundidad de suelo (cm).	21
7	Evapotranspiración diaria para la localidad de Córdoba (serie histórica 1970-1997). Las barras horizontales indican la ubicación del periodo crítico de determinación del rendimiento y la demanda promedio considerando un $K_c = 1$, para los cultivos de cártamo, garbanzo, trigo, triticale, colza y arveja. .	23
8	Contenido volumétrico de agua en función de la profundidad del perfil de suelo al final del ciclo de cada cultivo. CC representa la capacidad de	25

	campo y PMP el punto de marchitez permanente para este tipo de suelo.	
9	Porcentaje de agua útil para la capa explorada por las raíces en un período de -20 a +20 días alrededor de floración de cada especie. La profundidad de la capa de suelo explorada por las raíces entre -20 y +20 días alrededor de floración de cada especie surge a partir de las ecuaciones de VA (cm d ⁻¹) de la Fig. 5. La capa analizada para cada especie fue de 80 a 160 cm para arveja, 90 a 190 para garbanzo, 100 a 240 cm para triticale, 120 a 230 para trigo, 170 a 260 para cártamo y 160 a 240 para colza.	26
10	Porcentaje de agua útil para la capa de suelo de 0,6 a 2,6 m de profundidad en función del tiempo desde la siembra. Las flechas indican el momento de floración para colza (1); arveja (2); triticale (3); trigo (4); garbanzo (5); y cártamo (6).	28
11	Consumo acumulado de agua (mm) en función de los días desde la siembra para arveja, garbanzo, trigo, triticale, cártamo, colza. La flecha vacía indica el día de floración para arveja, trigo y cártamo, y flecha llena la de garbanzo, triticale y colza.	29
12	Fracción de intercepción de luz en función de los días desde la siembra. En orden de aparición de izquierda a derecha las flechas corresponden a la fecha de floración de colza, arveja, triticale, trigo, garbanzo y cártamo.	31

LISTA DE ABREVIATURAS

AU: agua útil

AU_{max}: agua útil máxima.

CC: capacidad de campo

C: consumo total de agua

CME: cuadrado medio entre

cm d⁻¹: centímetro por día

θ_d : contenido volumétrico de agua en el día d

θ_d^{-1} : contenido volumétrico de agua en el día previo

θ_{pmp} : contenido volumétrico de agua sobre el punto de marchitez permanente

ET₀: evapotranspiración potencial de referencia

EUA: eficiencia de uso del agua

EUA_{PST}: eficiencia de uso en el agua para peso seco total

EUA_{RG}: eficiencia de uso en el agua para rendimiento en grano

EUA_{RGgl}: eficiencia de uso del agua en términos de glucosa

ETc: evapotranspiración del cultivo

EUR: eficiencia de uso de la radiación fRFA: fracción de intercepción de radiación fotosintéticamente activa.

G: grano

Has: hectareas

IC: índice de cosecha

IRFA: radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada a madurez fisiológica

Kc: coeficiente del cultivo

kg ha⁻¹: kilogramo por hectárea

Li: límite inferior

Ls: límite superior

PE: profundidad máxima aparente de enraizamiento

PE_f (mm): precipitación efectiva

PP: precipitación

PMP: punto de marchitez permanente

PST: peso seco total

RFA_{inc}: radiación fotosintéticamente activa incidente

RG: rendimiento en grano

ΔS: variación de almacenaje de agua

T: transpiración

TA: tasa de absorción diaria de agua

T_{med}: temperatura media

VA: velocidad de avance del frente de absorción radical

1. INTRODUCCIÓN

Los retos más significativos a los que se enfrentará la humanidad en el futuro estarán asociados a problemas demográficos, de provisión de alimentos y energía y de degradación ambiental, entre otros (Andrade, 2011). El incremento pronosticado de la población mundial, tendrá lugar principalmente en países en desarrollo (UN, 2008), y se estima que la producción mundial de granos deberá aumentar cerca de un 70%, para abastecer la demanda ocasionada por el aumento en la población mundial (FAO, 2009; Andrade, 2011). A los problemas productivos se le suman otros como el cambio climático (IPCC 2007; Magrin, 2007), el incremento de la producción de biocombustibles en base a granos, (Edgerton, 2009) y la disponibilidad de agua dulce (UNEP, 2002). Estos constituyen graves riesgos para la seguridad alimentaria a largo plazo.

A pesar de que los países del hemisferio sur no son los principales responsables del cambio climático, podrían sufrir un importante efecto de los cambios en el clima ya que se incrementarían episodios meteorológicos tales como temperaturas extremas y cambios en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, lo que ocasionaría importantes descensos en los rendimientos (FAO, 2009; Hatfield *et al.*, 2001). Para contrarrestar estos efectos se requerirán sistemas de manejo agronómico que ofrezcan el mayor grado de resistencia a las adversidades climáticas, principalmente en ambientes en seco que permitan: i) almacenar la máxima cantidad de agua en el perfil del suelo y reducir el estrés de agua durante el periodo crítico de determinación del rendimiento de los cultivos y, ii) seleccionar especies de menor consumo pero de mayor eficiencia en el uso del agua (EUA).

En nuestro país, la consolidación de la soja como cultivo dominante, ha contribuido a establecer una rotación poco diversa y potencialmente inestable desde la perspectiva económica, ecológica y de la conservación del suelo. En este contexto, es necesario incluir en aquellos sistemas, cultivos que hagan un mayor aporte de biomasa en cantidad y calidad para mejorar el balance de carbono. Un ejemplo de esto lo constituyen los cultivos invernales, los cuales son considerados un eslabón importante dentro del sistema de producción.

Si bien el trigo es el cultivo invernal por excelencia, en los últimos años se ha originado un creciente interés de productores por otras especies invernales alternativas como garbanzo (*Cicer arietinum* L.), arveja (*Pisum sativum* L.), cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), colza (*Brassica napus* L.) y triticale (*Triticosecale Wittmack*).

La provincia de Córdoba, entre los cultivos alternativos al trigo, se destaca el garbanzo. El área cosechada de este cultivo, varió en las últimas campañas entre 13000 a cerca de 32000 ha (Fig. 1) siendo la producción total para 2015 algo superior a las 70000 tn. Los rendimientos para la serie histórica mostrada en la Fig. 1, oscilan entre los 1400 y 2500 kg/ha, y el nivel de producción total a nivel provincial estuvo más asociada al área sembrada que a los rendimientos logrados. La falta de ajuste en algunas prácticas de manejo como la elección del lote en relación a la cantidad de agua almacenada en el perfil de suelo, la adecuada planificación del aporte de agua por riego, el manejo de la sanidad de las semillas y del cultivo son consideraciones que merecen mayor atención en este cultivo.

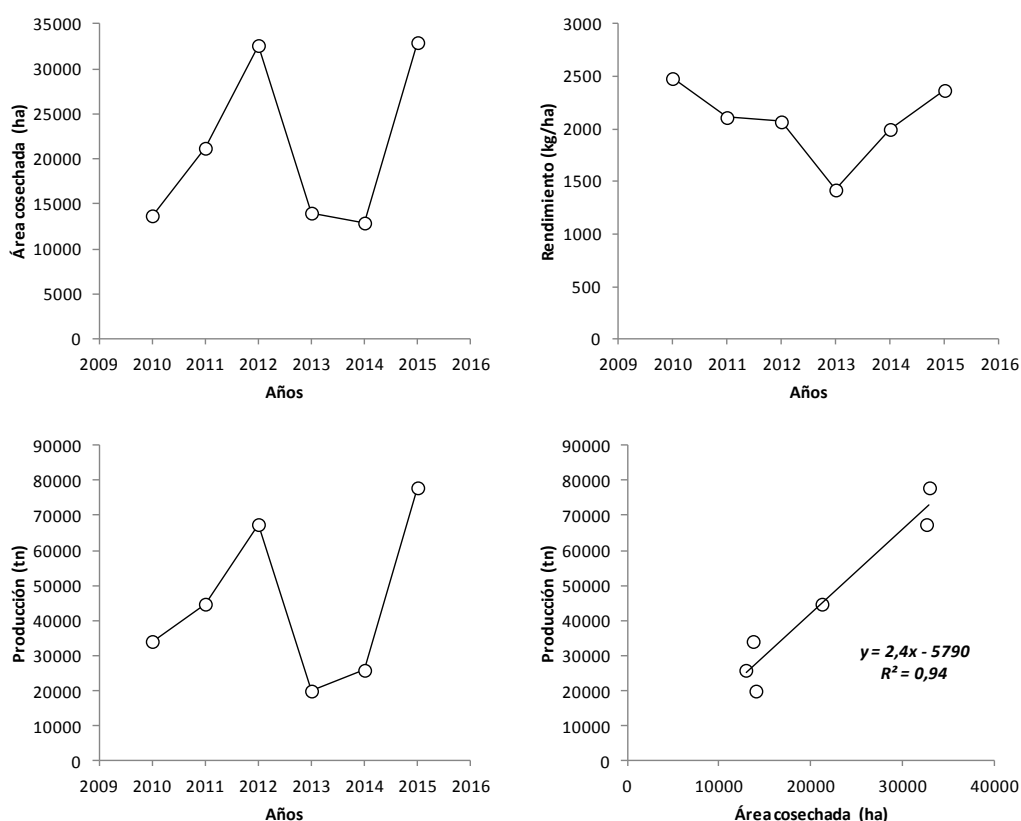


Fig. 1: Área cosechada, rendimiento y producción del Garbanzo en la provincia de Córdoba (Fuente: Bolsa de Cereales de Córdoba, 2017).

La producción de leguminosas como arveja, se está afianzando en Argentina a partir de la creciente demanda para la exportación, y paralelamente a través de la intensificación que se puede implementar en las rotaciones al incluir esta legumbre en las secuencias de cultivos. Habitualmente Argentina produce y exporta arveja como grano seco (Prieto *et al.*, 2013), siendo el sur de Santa Fe y noroeste bonaerense la zona núcleo de producción. No hay estadísticas oficiales sobre este cultivo. Según Rosennkjaer (2016), el área sembrada en Argentina es de 120000 ha, con una producción que va entre 90000 a 130000 tn/año, con un rendimiento promedio de 1200 kg/ha.

En el caso del cultivo de triticale, tampoco existe información oficial sobre el nivel de producción en Argentina. El mismo se ha difundido principalmente como especie forrajera o como cultivo de cobertura (Carfagno, 2008), aunque existen cultivares con destino a grano. El grano de esta especie se caracteriza por poseer baja calidad panadera (Aguirre *et al.*, 2002). Algunos autores señalan que la especie tiene mayor tolerancia al estrés hídrico respecto al trigo (Badiali *et al.*, 1991) y se presenta como una buena alternativa en ambientes con limitada oferta hídrica.

En el caso de las oleaginosas como el cártamo, los primeros datos oficiales fueron reportados en Argentina a partir del año 1969, y en las últimas campañas el 61% de la producción corresponde a la provincia de Salta, le sigue Chaco con el 29% y el 10% restante se reparte entre las provincias de Santiago del Estero y Buenos Aires (Estimaciones Agrícolas, 2017). Como se muestra en la Fig. 2, el incremento en los niveles de producción estuvieron asociados al área cosechada y no al rendimiento, ya que este último no tuvo una mejora aparente desde el año 1969, siendo el rendimiento promedio para la serie histórica 1969-2017 de 720 kg/ha.

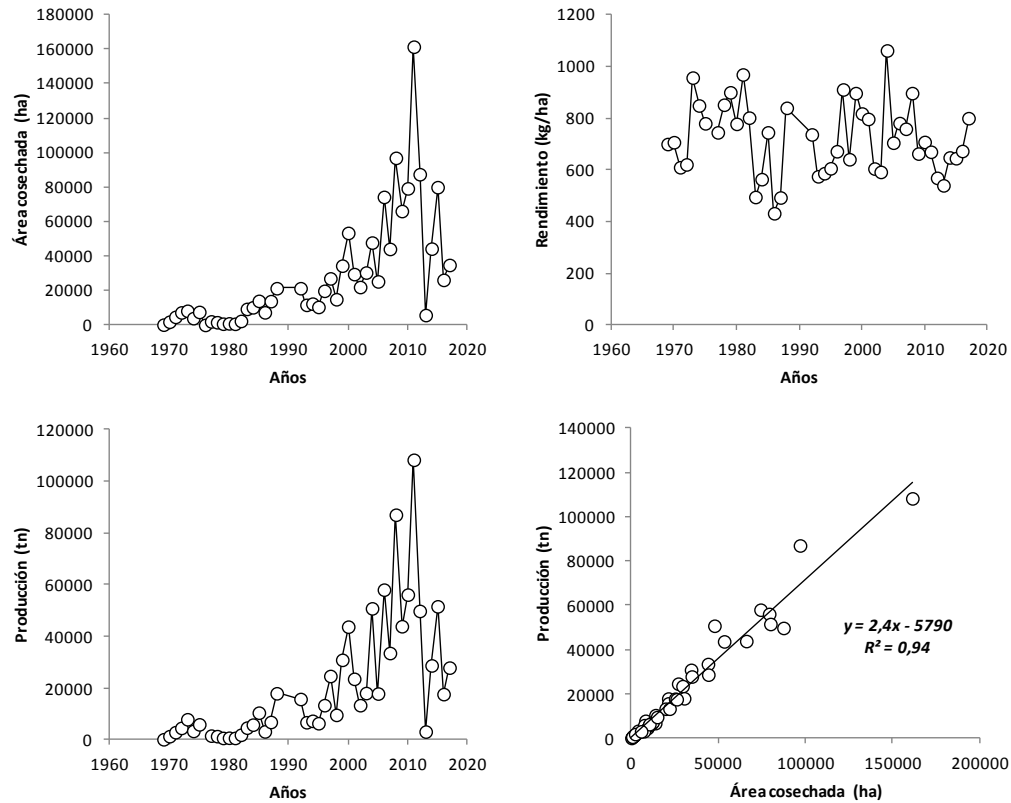


Figura 2. Área cosechada, rendimiento, producción y relación entre la producción y el área cosechada de cártamo en la Argentina, para la serie histórica 1969-2017 (Estimaciones Agrícolas, 2017).

Respecto al cultivo de colza, los primeros datos oficiales en Argentina son a partir de 1978. En la Fig. 3 se puede apreciar que el rendimiento nacional tuvo un incremento que varió desde 800 kg/ha mediados de los '70 hasta cerca de 2000 kg/ha en el año 2017, lo que puede indicar un aumento en la calidad genética de los materiales, como así también una mejora en las prácticas de manejo del cultivo. Sin embargo, el incremento en el nivel de producción estuvo más asociado con el aumento de la superficie cosechada. En la provincia de Córdoba la producción fue de 400 ha en el año 1995, alcanzando en el año 2013 unas 6000 ha, con una producción de 10450 tn (Estimaciones Agrícolas, 2017).

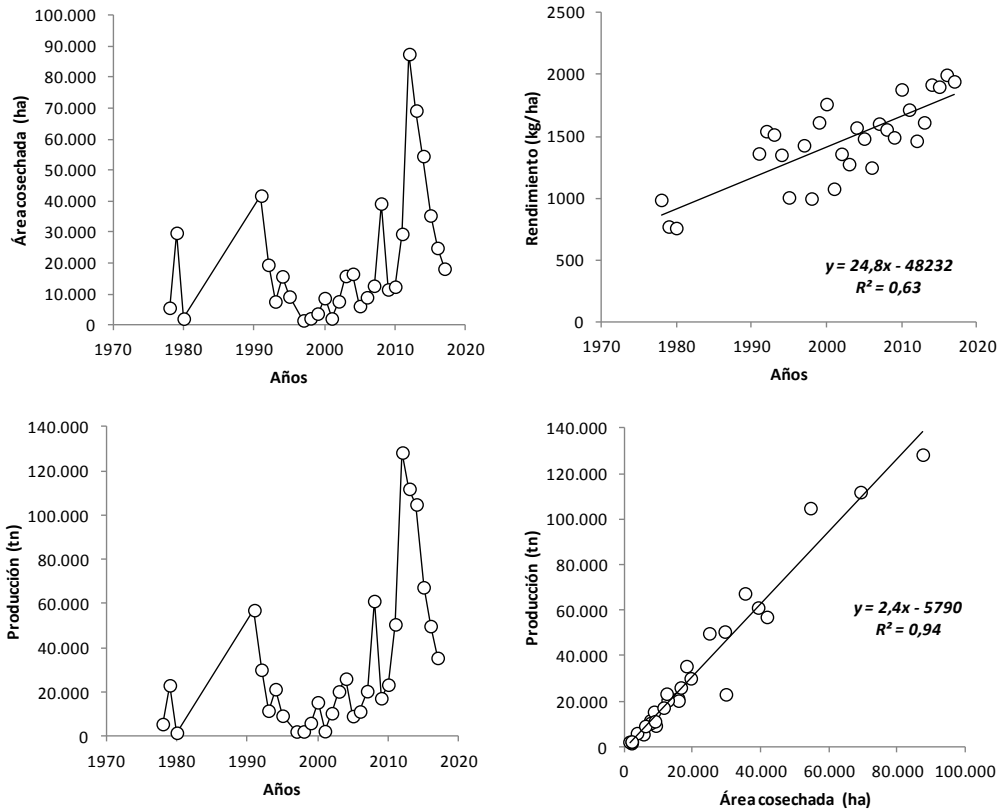


Figura 3. Área sembrada (a), rendimiento (b), producción (c) y relación entre producción y superficie sembrada (d) de Colza en Argentina (Fuente: Estimaciones agrícolas, 2017).

En la región central de Córdoba, los cultivos invernales crecen y maduran en ambientes donde la falta de agua avanza progresivamente en la estación de crecimiento y el rendimiento depende casi exclusivamente del agua almacenada en el perfil del suelo al momento de la siembra (Abbate y Cantarero, 2001; Martellotto *et al.*, 2005). Para elevar los actuales niveles de producción se requieren especies o cultivares con altas eficiencias de captura y de uso de recursos como el agua (Araus *et al.*, 2002).

Desde un punto de vista ecofisiológico, la relación entre la disponibilidad de un recurso y el rendimiento del cultivo se puede analizar considerando a este último como el producto entre: (i) la cantidad de recurso disponible, (ii) la eficiencia de captura (eficiencia de absorción para el caso del agua, interceptación para el caso de la radiación; es decir, la cantidad de recurso capturado por unidad de recurso disponible), (iii) la eficiencia de utilización (cantidad de peso seco producido por el cultivo por unidad de recurso capturado), y (iv) el índice de cosecha (rendimiento obtenido por unidad de peso seco del

cultivo) (Hunt *et al.*, 1990). La EUA es la pendiente de la relación entre la producción de biomasa y el consumo de agua. Debido a que la entrada de CO₂ y la salida de agua son controlados por los estomas, la producción de biomasa está también directamente relacionada con la cantidad de agua consumida por el cultivo (Passioura, 1996). Por su parte, la biomasa producida por el cultivo depende de la captura y de la eficiencia de uso de la radiación solar. Durante la estación de crecimiento, la cantidad de radiación interceptada está determinada por la magnitud del área foliar producida, su persistencia en el tiempo y la arquitectura del canopeo, las cuales a su vez están afectadas por el ambiente y las prácticas de manejo. Tanto la intercepción de radiación como la eficiencia de uso de la radiación (EUR) pueden ser afectadas por la disponibilidad de agua (Monteith, 1977; Biscoe y Gallagher, 1977; Khurana y McLaren, 1982; Squire *et al.*, 1984; Sinclair y Muchow, 1999) y por las características particulares de cada especie (i.e. arquitectura foliar, tipo de metabolismo de carbono).

En Córdoba, en el caso particular del cultivo de trigo y en ausencia de limitaciones hídricas, el consumo de agua para alcanzar los máximos rendimientos varía entre 500 y 600 mm y la EUA entre 7 y 10 kg de grano mm⁻¹ (Cantarero y Luque, 2007). En condiciones de secano la EUA es mayor, alcanzando valores que pueden llegar hasta 15 kg de grano mm⁻¹ (Cantarero y Luque, 2008; Abbate *et al.*, 2004). Para el caso del resto de las especies que involucran este estudio, existe muy poca información para la región centro de la provincia de Córdoba, acerca del consumo y eficiencia de uso del agua en este tipo de ambientes.

Según Dardanelli *et al.* (1997), durante períodos de sequía, la capacidad de un cultivo para absorber agua del suelo depende de la uniformidad y profundidad del sistema radical, mientras que la magnitud del estrés depende del balance entre el suministro de agua desde el perfil explorado por las raíces y la demanda atmosférica, la cual es inherente a cada ambiente y se caracteriza a través de la evapotranspiración de referencia (ET₀; Dardanelli *et al.*; 2003). La ET₀ representa el consumo de agua de un cultivo de alfalfa de 30 – 50 cm (Jensen *et al.*, 1990) o de una pastura de 8 – 15 cm de altura, creciendo activamente con buena disponibilidad de agua (Doorembos y Pruitt, 1977).

Según Dardanelli *et al.* (2003), la capacidad para absorber agua del suelo de un cultivo puede estudiarse a través de la combinación entre la velocidad de avance del frente

de absorción radical (VA; cm d^{-1}) y la tasa de absorción (TA; proporción diaria de agua que puede absorber el cultivo respecto al agua útil remanente).

La evolución en el tiempo del contenido de humedad volumétrica en una determinada capa de suelo, desde el momento en que el cultivo comienza a extraer agua de ella, sigue un patrón exponencial (Passioura, 1983). La dinámica de profundización de raíces, puede ser evaluada a campo por medio de la observación directa de la profundidad a la que se encuentra el ápice radical, lo cual es sumamente dificultoso. Por lo tanto se han desarrollado métodos indirectos para su estimación, basados en mediciones de humedad de suelo bajo condiciones de sequía (Dardanelli *et al.*, 2003). La profundidad máxima que alcanzan las raíces (PE), puede establecerse como aquella en la cual no se encuentran cambios en el contenido volumétrico de agua entre mediciones sucesivas.

En trigo, Cantarero *et al.* (2008) registraron profundidades del sistema radical superiores a los 2 m, y no encontraron diferencias en la VA y TA entre varios cultivares. Sin embargo, estas variables fueron marcadamente inferiores a las encontradas por Dardanelli *et al.*, (1997) en cultivos estivales. El trigo requiere más tiempo que los cultivos de verano para alcanzar el período crítico para la definición del rendimiento porque crece en estaciones más frías. En ambientes como el centro de Córdoba donde el cultivo crece en una estación donde la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones es relativamente baja, una estrategia adaptativa sería, identificar especies que tengan menor VA y TA para que no agoten prematuramente las reservas de agua dentro del perfil de suelo y puedan llegar con un mejor balance hídrico a los períodos críticos de determinación de rendimiento.

La diversificación del sistema de producción con diferentes cultivos invernales puede mejorar sensiblemente la productividad y la eficiencia de uso de agua del sistema. Sin embargo, no se han realizado estudios sobre las estrategias que manifiestan estas especies para consumir agua en condiciones de limitada oferta hídrica como las que se presentan en el centro de Córdoba. Por lo tanto el objetivo del presente trabajo fue evaluar el patrón de absorción de agua edáfica, caracterizado por VA, PE, y TA, correspondiente a diferentes especies invernales como: trigo, triticale, colza, cártamo, garbanzo y arveja.

1.1. HIPÓTESIS

- a) Entre las especies invernales (trigo, triticale, colza, cártamo, arveja y garbanzo), existen diferencias en el patrón de absorción de agua en el perfil del suelo caracterizado por velocidad de avance del frente de absorción radical, tasa de absorción y profundidad máxima de enraizamiento
- b) Las diferenciales en el patrón de absorción de agua entre las especies, generan diferencias en el consumo y en la eficiencia de uso de agua.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Contribuir al conocimiento de los procesos y relaciones causales que determinan el consumo y la eficiencia de uso del agua, a fin de incrementar la producción de cereales y oleaginosas en la región central de Córdoba y mejorar la sustentabilidad de los sistemas productivos.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar el patrón de absorción de agua de cada especie a través de la velocidad de avance del frente radical, la profundidad máxima de enraizamiento y la tasa de absorción de agua.
- b) Cuantificar el consumo y la eficiencia de uso del agua para cada especie.
- c) Analizar la producción de biomasa y rendimiento de las diferentes especies invernales, caracterizando la eficiencia de intercepción y de uso de la radiación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Durante la campaña 2011 se realizó un experimento, en el Campo Escuela de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba (31° 30' S, 64° 00' O). El experimento se realizó en condiciones de secano sobre un suelo Haplustol éntico (Soil Survey Staff, 2003), con horizontes A, AC y C. Algunas propiedades del suelo son similares a las reportadas por Dardanelli *et al.* (1997) y se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del suelo correspondientes al sitio experimental

Horizonte	A	AC	C
Profundidad (cm)	0-23	23-45	+54
Carbono orgánico (g kg ⁻¹)	13,2	4,8	2,4
pH (1:1)	7,1	7,3	7,7
Arcillas (g kg ⁻¹)	157	161	121
Limo (g kg ⁻¹)	667	682	692
Arena (g kg ⁻¹)	176	157	165
Capacidad de campo (cm ³ cm ⁻³)	0,327	0,290	0,270
Punto de marchitez permanente a 1500 kPa (cm ³ cm ⁻³)	0,145	0,117	0,115

El 31 de mayo se sembró un cultivar de cada una de las siguientes especies: trigo (Klein Tauro), triticale (LAC4-19 FCA), colza (Rivette), cártamo (origen mexicano), garbanzo (Chañaritos S-156) y arveja (Viper). Las parcelas fueron de siete metros de largo y diez hileras distanciadas a 0.2 m para trigo, triticale, colza y arveja y 0.35 m para garbanzo y cártamo. La densidad de siembra fue de 250 semillas m⁻² para trigo y triticale, 50 para garbanzo, 100 para arveja, 60 para colza y 33 para cártamo.

El diseño experimental fue en bloques completos al azar con tres repeticiones. Los registros climáticos fueron tomados de una estación agrometeorológica ubicada a 100 m del experimento. La evapotranspiración de referencia (ET₀) media diaria fue calculada por el método Penman- Monteith de acuerdo a Allen *et al.* (1998) utilizando el software Agroclima (Abatte, 2004).

Las parcelas se manejaron sin deficiencias de nutrientes y con adecuado control de plagas y enfermedades. Al momento de la siembra se determinó el contenido de agua en el suelo por gravimetría, tomando una muestra en cada bloque, cada 0,2 m hasta los 3 m de profundidad. La lámina de agua útil del suelo fue determinada como el producto de la diferencia entre el contenido volumétrico de agua y el PMP y la profundidad de la capa de suelo (mm).

Las fechas de floración y madurez fisiológica fueron determinadas en cada parcela cuando el 50% de las plantas alcanzaron ese estado. Estos eventos fueron registrados según las escalas fenológicas de Zadoks *et al.* (1974) para trigo y triticale, Weber y Bleiholder (1990) para colza, Montoya Coronado (2010) para cártamo, Knott *et al.*, (1987) para arveja y Toledo, (2016) para garbanzo. A partir de los 60 días desde la siembra, en dos repeticiones de cada parcela, se determinó el contenido volumétrico de agua para cada capa de suelo de 0,2 m, hasta 2,60 m de profundidad con una sonda de neutrones. Las mediciones se realizaron cada 7 días hasta madurez fisiológica.

La fracción de interceptación de la radiación fotosintéticamente activa se midió cada 7 a 10 días desde la emergencia del cultivo hasta madurez fisiológica, utilizando un sensor cuántico lineal (Decagón Devices Inc.). Las mediciones se realizaron entre las 11:00 y 14:00 horas. La fracción de radiación fotosintéticamente activa (fRFA) se calculó según la Ec. 1:

$$fRFA = 1 - \left[\frac{I}{I_0} \right] \quad \text{Ec. 1}$$

Donde I es la RFA registrada a nivel del estrato más bajo de hojas verdes, e I_0 es la RFA incidente sobre el cultivo. La fRFA diaria entre mediciones fue calculada por interpolación lineal. La cantidad diaria total de RFA interceptada fue calculada como el producto entre la fRFA y la RFA incidente (RFA_{inc}). La RFA_{inc} se calculó multiplicando la radiación global incidente medida en la estación meteorológica por 0,45 (Monteith, 1972). La cantidad total de RFA interceptada (IRFA) fue calculada como la sumatoria de los valores desde emergencia a madurez fisiológica. La eficiencia de uso de la radiación (EUR), fue estimada como el cociente entre el peso seco total del cultivo y la IRFA.

Según Monteith (1986), asumiendo que un perfil de suelo está equilibrado en un dado contenido volumétrico de agua, el momento en el cual el contenido volumétrico comienza a decrecer indica que el frente de raíces ha llegado a una determinada capa. Por lo tanto, se ajustó un modelo lineal para determinar el avance en profundidad del frente de absorción radical, graficando la profundidad en función del tiempo (días o tiempo térmico) en que comienza la primera extracción en cada capa de suelo. La pendiente de dicha relación fue entonces la VA, expresada en cm d^{-1} o $\text{cm }^{\circ}\text{Cd}^{-1}$. Para el cálculo del tiempo térmico, la temperatura base utilizada fué de 0°C para trigo, triticale, colza y arveja (Miralles *et al.*, 2014; Nanda *et al.* 1996; Knott *et al.*, 1987) y de 4°C para garbanzo y cártamo (Toledo, 2016; Coronado, 2010).

Los valores de TA representan la máxima fracción de agua útil remanente que puede absorber cada cultivo en un día. La TA promedio fue estimada para el estrato 0,4 - 1,6 m de profundidad del perfil de suelo. La TA se obtuvo ajustando la siguiente ecuación propuesta por Dardanelli *et al.*, (2004):

$$TA = \left(\frac{\theta_d - \theta_d^{-1}}{\theta_d^{-1} - \theta_{pmp}} \right) * -1 \quad \text{Ec. 2}$$

Donde: θ_d ($\text{cm}^3\text{agua cm}^{-3}\text{suelo}$) es el contenido volumétrico de agua en un día determinado, θ_d^{-1} ($\text{cm}^3\text{agua cm}^{-3}\text{suelo}$) es el contenido volumétrico de agua en el día previo, y $\theta_d^{-1} - \theta_{pmp}$ ($\text{cm}^3\text{agua cm}^{-3}\text{suelo}$) es el contenido volumétrico de agua sobre el punto de marchitez permanente del día previo. Esta ecuación brinda un ajuste de tipo exponencial que se optimizó iterativamente hasta obtener la TA que minimizó el Cuadrado Medio del Error entre los valores observados y predichos.

Como la presencia de raíces genera un agotamiento del agua del suelo que responde a un patrón exponencial, la profundidad máxima de enraizamiento (PE) quedó establecida por la profundidad de la última capa de suelo que mostró este patrón.

El consumo total de agua (C), fue determinado acumulando los consumos parciales entre mediciones sucesivas del contenido de agua en el suelo, desde el comienzo de las mediciones, mediante la siguiente ecuación:

$$C = \sum_{i=1}^n PEf + \Delta S \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde: PEf es el agua suministrada al suelo por la precipitación efectiva, y ΔS es la variación de almacenaje y es la suma de agua en mm de cada intervalo de medición con la sonda. La PEf fue calculada con una ecuación obtenida por Dardanelli *et al.*, (1992), para un suelo similar y a partir de valores de precipitación diaria (PP) superiores a 15 mm (Ec. 4):

$$PEf = 2,43 * PP^{0,667} \quad \text{Ec. 4}$$

En madurez se tomaron muestras de todas las parcelas para determinar el rendimiento en grano (RG) y el peso seco total (PST) del cultivo sobre una superficie de 1 m² por parcela. Las muestras se secaron a 60°C, hasta peso constante y se pesaron. El índice de cosecha (IC) se calculó como la relación entre el rendimiento y el peso seco total del cultivo. La eficiencia de uso del agua para grano (EUA_{RG}) y la eficiencia de uso del agua para peso seco total del cultivo (EUA_{PST}) se calculó como el cociente entre RG o el PST y C respectivamente.

La EUA_{RG} también fue calculada de acuerdo al costo energético del grano de cada especie (EUA_{RGgl}). La composición química del grano de cada especie fue considerada de acuerdo al trabajo de Sinclair y de Wit (1975) y se muestra en la Tabla 2. Por su parte, el costo energético de RG se estimó de acuerdo a Penning de Vries (1974). Este último autor establece que una unidad de glucosa produce 0,83 unidades de carbohidratos, 0,40 unidades de proteína o 0,33 unidades de lípidos. La composición química de la semilla de triticale se asumió similar al requerimiento energético de la semilla de trigo.

Tabla 2: Composición química del grano de cada especie, valores porcentuales de hidratos de carbono (HC), proteínas (Prot) y lípidos (Lip).

Especie	HC	Prot	Líp
	(%)		
Trigo	82	14	2
Colza	25	23	48
Cártamo	50	14	33
Garbanzo	68	23	5
Arveja	68	27	2

Los datos fueron analizados estadísticamente con InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2008) mediante ANOVA y cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$) las medias se compararon a través de la diferencia mínima significativa (DMS).

3. RESULTADO Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización agrometeorológica

Las condiciones agrometeorológicas que presentó el año 2011 fueron similares a las normales para la región, en donde se puede apreciar un marcado déficit hídrico (PP-ET₀) en todos los meses durante los cuales estuvieron creciendo los cultivos (Tabla 3). Esta condición es típica de regiones como las del centro de la provincia de Córdoba, en donde los cultivos desarrollan la mayor parte del ciclo con bajo nivel de precipitaciones (Abbate y Cantarero, 2001; Martellotto *et al.*, 2005). Las PP acumuladas desde junio hasta setiembre fueron de 39 mm y desde octubre a diciembre de 243 mm y ambos valores fueron similares a los registros históricos (Tabla 3). La temperatura media de la campaña (Tmed) fue relativamente similar a la media histórica de un período de 30 años (Tabla 3).

Tabla 3. Valores mensuales de temperatura media (Tmed; °C), precipitación (PP; mm) y evapotranspiración de referencia (ET₀; mm) y nivel de deficiencia (PP-ET₀) durante la estación de crecimiento de los cultivos para el año 2011 y valores históricos (período 1966 - 1996).

Variable Climática	Meses							
	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
2011	Tmed	10,1	9,9	11,0	16,2	17,7	22,0	23,3
	PP	33,8	0,0	5,0	0,0	83,6	108,6	51,0
	ET ₀	47,0	63,7	94,9	165,3	148,5	197,8	219,4
	PP-ET ₀	-11,4	-38,5	-87,3	-149,9	-62,9	-85,6	-168,4
Histórico	Tmed	12,2	10,9	13,5	15,3	18,3	21,3	23,4
	PP	10,3	10,7	9,8	27,6	53,6	86,0	111,9
	ET ₀	60,8	73,9	100,5	131,9	163,2	183,0	199,4
	PP-ET ₀	-50,5	-63,2	-90,7	-104,3	-109,6	-97,0	-87,5

3.2 Fenología

Las especies difirieron en la duración del período desde siembra hasta madurez fisiológica, siendo el cártamo el cultivo que más tardó en alcanzar la floración (150 días) y madurez (196 días) (Tabla 4). Por el contrario, la arveja fue el cultivo más precoz, alcanzando la madurez a los 140 días desde la siembra (Tabla 4). El garbanzo fue la segunda especie de ciclo más largo después del cártamo (19 días más corto), en tanto que trigo, triticale y colza maduraron entre 40 y 35 días más temprano que esta última especie.

Tabla 4. Especies, cultivar, fechas de siembra, floración y madurez fisiológica y días desde siembra a floración (S-F), floración a madurez (F-M) y siembra a madurez (S-M).

Espece	Cultivar	Siembra	Floración (fecha)	Madurez	S-F	F-M (días)	S-M
Trigo	Klein Tauro	31/05	22/09	03/11	114	42	156
Triticale	LAC4 – 19FCA*	31/05	16/09	03/11	108	48	156
Colza	Rivette	31/05	08/09	08/11	100	61	161
Arveja	Viper	31/05	12/09	18/10	104	36	140
Garbanzo	Chañaritos S-156	31/05	25/09	24/11	117	60	177
Cártamo	Origen Mexicano**	31/05	28/10	13/12	150	46	196

*Línea avanzada del programa de mejoramiento de triticale de la FCA-UNC.

**Línea avanzada de origen mexicano.

3.3 Contenido de agua en el suelo al momento de siembra y precipitaciones ocurridas durante el ciclo para cada especie

Al momento de la siembra el contenido de agua útil fue de 292 mm hasta los 2,60 m de profundidad. Esto representa el 72 % de la máxima capacidad de almacenaje para este tipo de suelo y profundidad (Fig. 4).

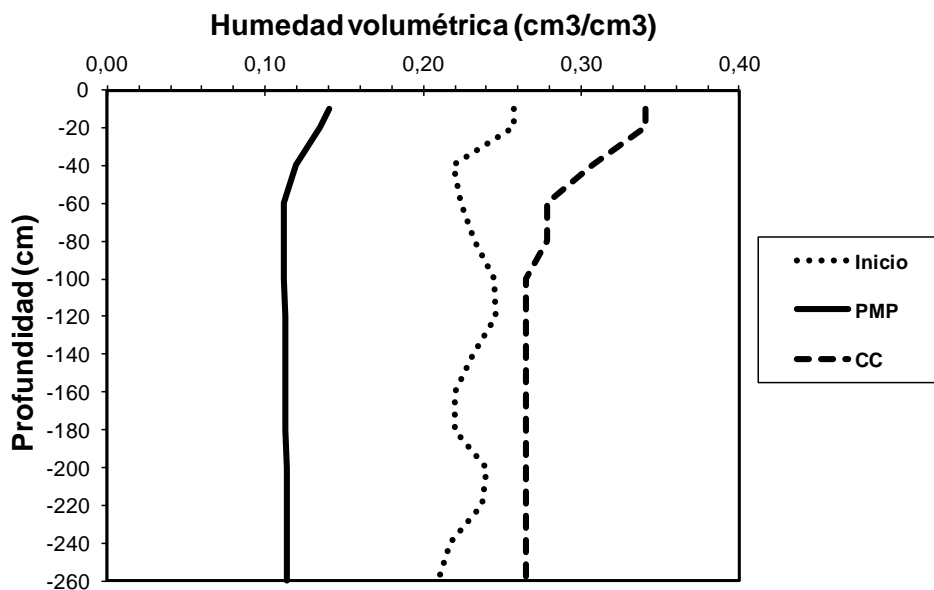


Figura 4: Humedad volumétrica hasta 2,60 m de profundidad del suelo al inicio del experimento (Inicio), punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de campo (CC).

Las lluvias durante el ciclo ocurrieron predominantemente durante la etapa de llenado de los granos (Tabla 5). El aporte de las precipitaciones durante la fase desde siembra hasta floración fue de escasa magnitud y se produjo en los primeros estados del ciclo de los cultivos, salvo en cártamo, cultivo que debido a su mayor longitud de ciclo a floración, pudo aprovechar las primeras lluvias primaverales antes de la ocurrencia de este estado fenológico.

Tabla 5. Precipitación (PP) y precipitación efectiva (PEf) acumuladas para los períodos de Siembra – Floración, Floración – Madurez y Siembra – Madurez. Los valores de PEf fueron calculados según la Ec. 4 (Dardanelli *et al.*, 1992).

Especie	Siembra - Floración		Floración - Madurez		Siembra - Madurez	
	PP	PEf	PP	PEf	PP	PEf
Trigo	39	33	84	78	123	111
Triticale	39	33	84	78	123	111
Colza	39	33	84	78	123	111
Cártamo	122	111	138	118	260	228
Garbanzo	39	33	171	147	210	181
Arveja	39	33	58	52	97	85

3.4 Velocidad de avance del frente de extracción radical

En la Figura 5 se presentan las relaciones entre la profundidad aparente de enraizamiento y el tiempo desde la siembra (días ó °Cd) para cada especie. El valor de la pendiente de cada ecuación de regresión es la VA. Todos los modelos tuvieron un elevado ajuste ($R^2 > 0,94$; $p < 0,01$). Además, las pendientes para cada especie fueron significativamente distintas de 0 ($p < 0,01$).

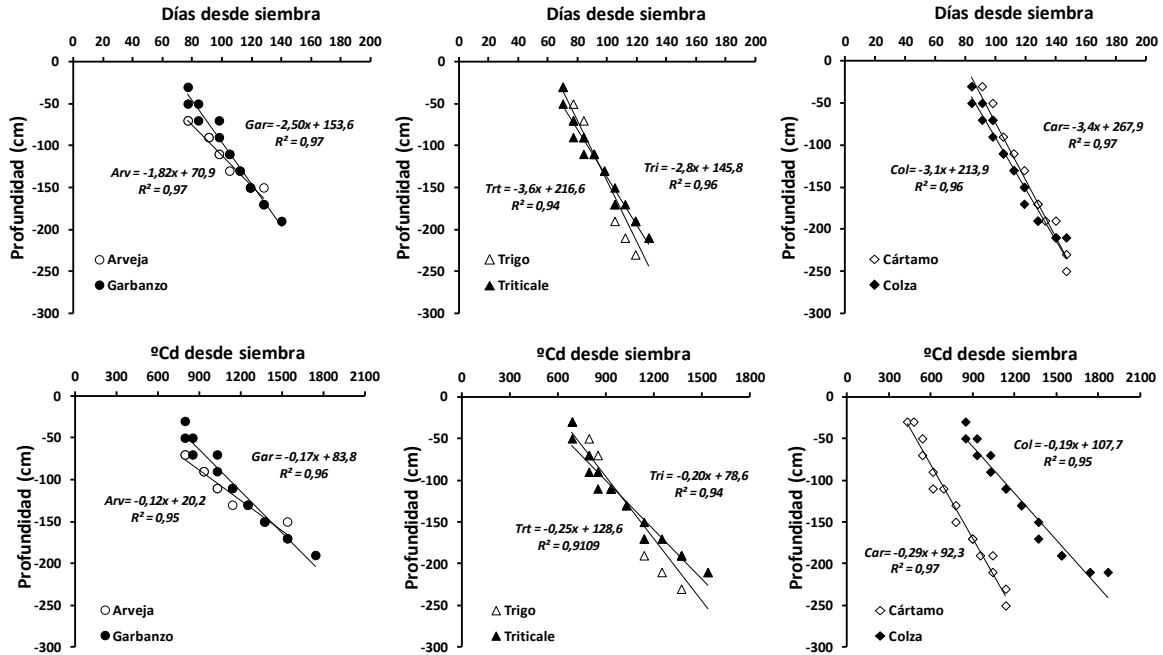


Figura 5: Profundidad aparente de las raíces en función de los días desde la siembra y del tiempo térmico para Arveja (círculos vacíos), Garbanzo (círculos llenos), Trigo (triángulos vacíos), Triticale (triángulos llenos), Cártamo (rombos vacíos), Colza (rombos llenos). Las pendientes de las rectas de ajuste representan la velocidad de profundización de las raíces (VA).

La menor VA, estimada tanto en cm d^{-1} como en $\text{cm } ^\circ\text{Cd}^{-1}$, correspondió a la arveja siendo esta la mitad que la obtenida por cártamo y triticale, logrando el resto de los cultivos valores intermedios (Tabla 6). En un estudio similar realizado por Cantarero *et al.*, (2008), en un suelo con las mismas características que la de estos experimentos, y caracterizando cuatro cultivares de trigo, se encontró que la VA entre los primeros 40 y 135 días desde la siembra fue levemente inferior a las reportadas en este trabajo. Esto puede sugerir algún grado de mejora en VA, ya que los cultivares de trigo utilizados en aquel trabajo fueron más antiguos. Nuevos estudios en donde se comparen genotipos de trigo de distintos años de liberación deberán ser llevados a cabo para confirmar esta hipótesis.

Comparando los valores de VA obtenidos por Dardanelli *et al.* (1997) en un suelo Hapludol de la provincia de Córdoba para especies estivales, el triticale, el cártamo, la

colza y el trigo tuvieron valores similares de VA a los obtenidos para soja y maíz; y en el caso de garbanzo y arveja sus VA fueron levemente inferiores a las de maní (Tabla 6). Estas similitudes y diferencias entre cultivos estivales e invernales pueden deberse a características propias de cada especie relacionadas con la arquitectura del sistema radical y a las condiciones ambientales en que se desarrolla cada cultivo (ie.: temperatura durante la estación de crecimiento).

3.5 Profundidad máxima de enraizamiento

La arveja fue el cultivo de menor exploración radical en el perfil de suelo (Tabla 6), y esta fue similar a la encontrada por Dardanelli *et al.*, (1997) para maní y soja de ciclo corto (Tabla 7). En cártamo, no pudo determinarse la PE, ya que los tubos de acceso de la sonda permitieron explorar solo hasta 2,60 m. Sin embargo, los datos sugieren que este cultivo pudo alcanzar una profundidad superior a los 2,60 m, ya que el perfil del suelo quedó con un contenido volumétrico de agua equivalente al PMP hasta esa profundidad (Fig. 8). Montoya Coronado (2010) menciona que las raíces de este cultivo poseen una gran capacidad para profundizar, pudiendo superar los 3 m de profundidad.

Los cultivos de trigo, triticale, colza y garbanzo tuvieron similares PE (Tabla 5), y estos fueron similares los valores reportados por Dardanelli *et al.* (1997) para soja de ciclo largo (Tabla 7). Johnston *et al.*, (2002) trabajando en las grandes planicies de América del Norte obtuvieron valores de PE para colza que variaron entre 1,14 y 1,65 m y para cártamo entre 1,64 y 2,20 m, estos menores valores de PE pueden estar relacionados a las menores temperaturas registradas en esos ambientes, respecto a la región central de Córdoba. Por su parte, la PE encontrada para trigo fue similar a la establecidas por Cantarero *et al.* (2008) en cuatro cultivares de trigo.

En general PE se alcanzó a mediados del período de llenado del grano. Esto sugiere, que el destino de asimilados hacia el crecimiento de raíces es importante hasta ese momento y esto contribuye a la exploración del perfil del suelo por parte de las raíces. Posteriormente el suministro de carbono se desvía hacia destinos reproductivos (granos), y el crecimiento del resto de los órganos de la planta es reducido (Begg y Turner, 1976). Se ha establecido para cultivos como trigo, que existe un bajo grado de limitación por fuente

de asimilados para el llenado de los granos (Borrás *et al.*, 2004), esto puede estar indicando un flujo extra de carbono para el crecimiento de raíces que mantengan la profundización hasta estados reproductivos avanzados como los encontrados en este trabajo.

3.6 Tasa de absorción de agua de las raíces

Los valores de TA obtenidos representan la máxima fracción de agua útil remanente que puede absorber cada cultivo en un día. La TA promedio fue estimada para el estrato entre 0,4 y 1,6 m de profundidad del suelo. Los menores valores de TA correspondieron a los cultivos de arveja y garbanzo, y los valores máximos para trigo y colza, mientras que cártamo y triticale presentaron valores intermedios (Tabla 6).

Tabla 6. Velocidad de avance del frente de absorción radical (VA), profundidad máxima de enraizamiento (PE) y la tasa de absorción de agua (TA) para este estudio.

Especie	VA (cm d ⁻¹)	PE (cm)	TA (d ⁻¹)
Trigo	2,6	240	0,045
Triticale	3,5	240	0,034
Colza	2,9	240	0,043
Cártamo	3,3	>260	0,039
Garbanzo	2,5	240	0,017
Arveja	1,8	160	0,012

En la mayoría de los cultivos la TA decreció con la profundidad, salvo en cártamo en donde esta aumentó hasta 1,4 m, y a partir de esta profundidad disminuyó, pero se mantuvo en valores más altos respecto al resto de los cultivos (Fig. 6).

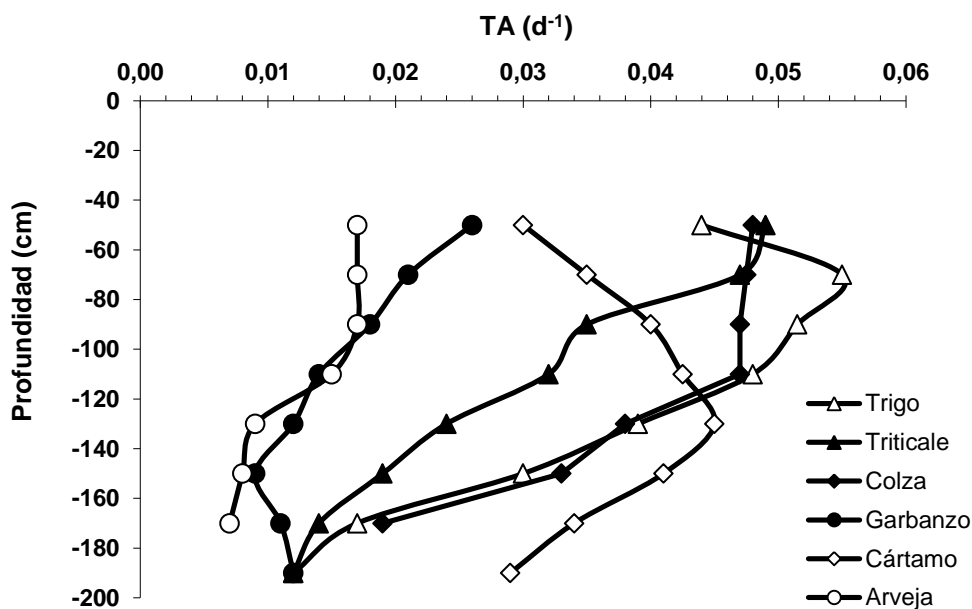


Figura 6: Tasa de extracción para los cultivos de Trigo, Triticale, Colza, Garbanzo, Cártamo y Arveja en función de la profundidad de suelo (cm).

Si se comparan los patrones de absorción de especies invernales como las evaluadas en este estudio, con los patrones de especies estivales obtenidos por otros autores, se aprecia que las diferencias están principalmente asociadas a TA (Tabla 7). Los cultivos invernales presentan siempre menores valores de TA. En promedio, las tasas de las especies invernales fueron menos de la mitad que las tasas de girasol, maíz, soja, y maní (Dardanelli *et al.*, 1997; Tabla 6). Esta característica, para ambientes caracterizados por inviernos secos en donde los cultivos dependen principalmente del agua almacenada al momento de la siembra, puede representar una ventaja, ya que se evitaría un agotamiento prematuro de las reservas de agua del suelo antes del comienzo del período crítico para la determinación del rendimiento.

Tabla 7. Velocidad de avance del frente de absorción radical (VA), profundidad máxima de enraizamiento (PE) y la tasa de absorción de agua (TA) realizado por Cantarero *et.al.*, (2008) en trigo en el campo escuela de la facultad de agronomía – UNC y por Dardanelli *et.al.*, (1997) en EEA INTA Manfredi.

Especie	VA (cm d^{-1})	PE (cm)	TA (d^{-1})	Fuente
Trigo	2,1	290	0,039	Cantarero <i>et al.</i> , 2008
Girasol	4,4	250 – 290	0,084 – 0,110	Dardanelli <i>et al.</i> , 1997
Soja	3,4	130 – 230	0,082 – 0,098	Dardanelli <i>et al.</i> , 1997
Maíz	3,0	190	0,088	Dardanelli <i>et al.</i> , 1997
Maní	2,3	150	0,058	Dardanelli <i>et al.</i> , 1997

En el presente estudio se pudo caracterizar cada una de las estrategias que utilizan las especies evaluadas respecto a su capacidad de absorber agua desde el perfil del suelo. Las variables estudiadas permiten comparar diferencias y semejanzas en relación al consumo de agua entre especies. A modo de ejemplo teórico se muestran en la Tabla 8, dos condiciones que pueden presentarse de acuerdo a diferentes combinaciones de TA y demanda atmosférica.

Tabla 8: Agua útil (AU), tasa de absorción (TA), potencial de absorción diaria (P_{abs}), demanda atmosférica diaria (ET_0) y consumo diario (ET_c).

AU (mm)	TA (d^{-1})	ET_0 (mm d^{-1})	P_{abs} (mm d^{-1})	ET_c (mm d^{-1})
150	0,02	4	3	3
150	0,04	4	6	4
$ET_c = ET_0 * K_c$; $K_c = 1$				

En el caso de que la demanda atmosférica sea mayor a la absorción de agua por parte del cultivo, la evapotranspiración del cultivo estará determinada por la TA y el cultivo sufrirá estrés hídrico; por el contrario en el caso en que la primera sea menor a la

capacidad de absorber agua, el consumo será igual a la demanda atmosférica, y el cultivo no sufrirá estrés. Si la absorción, determinada por la TA y el contenido de agua útil del suelo, es inferior a la demanda atmosférica y el cultivo se encuentra en su período crítico de determinación del rendimiento, la aplicación de riego suplementario tendría su mayor impacto productivo. Esto puede permitir una mejor interpretación de los balances hídricos de los cultivos.

La Fig. 7 muestra la ET_0 diaria para la localidad de Córdoba y el momento de ocurrencia del período crítico para cada especie. Los valores de demanda (ET_0) varían entre 4,6 y 5,7 mm d^{-1} . Para que los cultivos no sufran estrés durante esta etapa, estos deben lograr abastecer la demanda. Por su parte, si cada cultivo en este período logra alto nivel de interceptación de radiación, y que sus raíces alcancen la PE y su respectiva TA, puede suponerse que aquellos con menor TA deberán tener el perfil de suelo con mayor contenido hídrico. Esto puede ser logrado con riegos más frecuentes, por ejemplo, en cultivos como arveja o garbanzo.

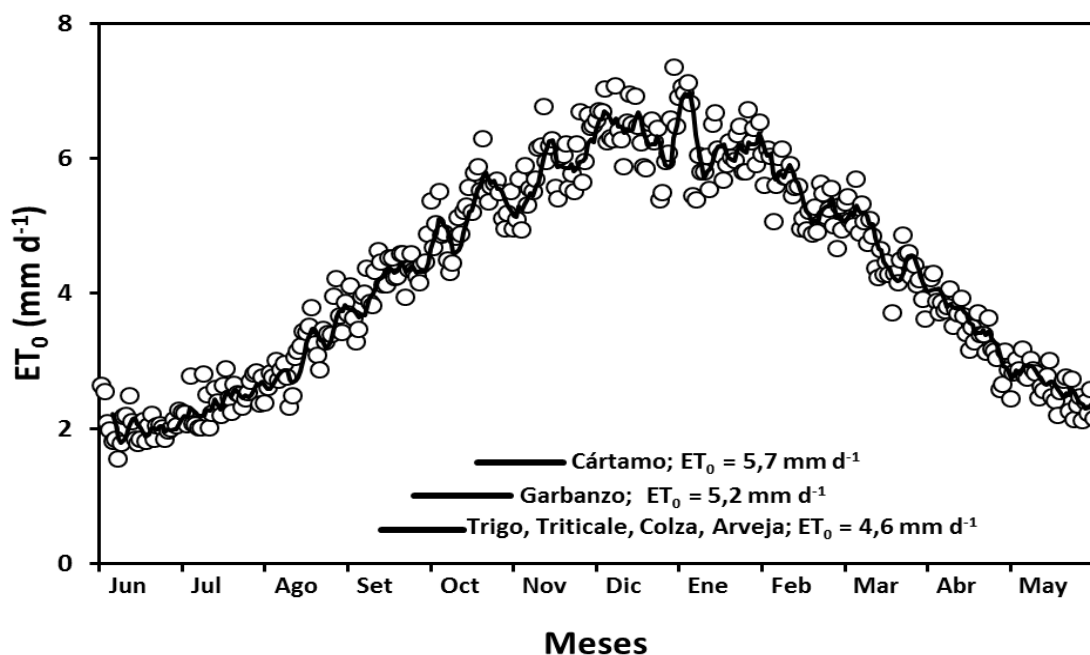


Figura 7. Evapotranspiración diaria para la localidad de Córdoba (serie histórica 1970-1997). Las barras horizontales indican la ubicación del periodo crítico de determinación

del rendimiento y la demanda promedio considerando un $K_c=1$, para los cultivos de cártamo, garbanzo, trigo, triticale, colza y arveja.

Las distintas estrategias de los cultivos para absorber agua, ponen en evidencia que los umbrales de riego (difundidos ampliamente como un criterio de riego para evitar déficit hídrico), no deberían ser fijos e iguales para cada cultivo. Se deben tener en cuenta factores como la TA, VA y PE y otros, como son el tipo de suelo y la demanda atmosférica.

Por su parte, en este trabajo solo se evaluó un genotipo por especie, lo que pone de manifiesto la necesidad de analizar la variabilidad genética en el patrón de absorción de agua, principalmente observando la TA. Además, nuevos estudios son necesarios en condiciones de riego y bajo alta demanda ambiental, para evaluar la respuesta de genotipos de una misma especie con diferente VA, TA y PE a diferentes umbrales de riego.

3.7 Variación en el contenido de agua útil del suelo y su consumo

La combinación de la longitud del ciclo, VA, PE y TA de cada especie establecieron diferentes patrones de consumo de agua, los que repercutieron en el contenido de agua en que dejaron el perfil del suelo al finalizar su ciclo. La arveja fue el cultivo que dejó el mayor contenido de agua útil en el perfil de suelo como consecuencia de su menor duración de ciclo y de su baja VA, PE, TA (Fig. 8; Tabla 4 y 6).

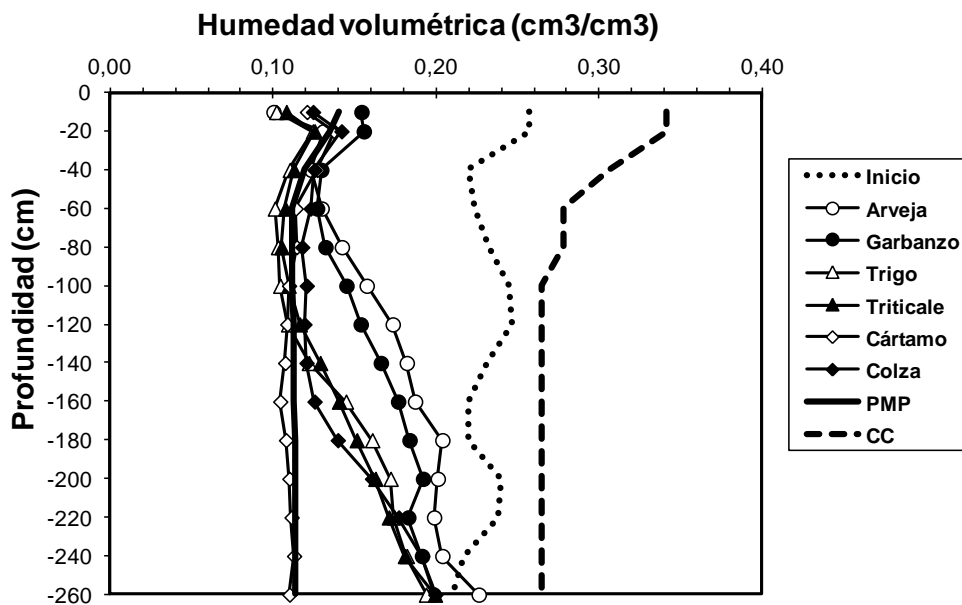


Figura 8: Contenido volumétrico de agua en función de la profundidad del perfil de suelo al final del ciclo de cada cultivo. CC representa la capacidad de campo y PMP el punto de marchitez permanente para este tipo de suelo.

En garbanzo la TA fue levemente superior a la arveja (Tabla 6), pero su VA, PE y duración de ciclo fue mayor y consecuentemente secó más el perfil de suelo que esta especie (Fig. 8). El trigo mostró similar VA y PE que el garbanzo, pero una TA superior, por lo que el perfil terminó más seco que el garbanzo, inclusive con un ciclo 9 días menor (Fig. 8; Tabla 4 y 6). El trigo y triticale tuvieron la misma duración de ciclo (Tabla 4) y dejaron un perfil hídrico similar (Fig. 8), pero con diferentes estrategias. El trigo tuvo mayor TA y menor VA que triticale (Tabla 6), y triticale mayor VA y menor TA que el cultivo de trigo (Tabla 6). En colza el contenido de agua en el perfil fue similar a la del trigo y triticale (Fig. 8) con valores similares de VA, y TA al de estos cultivos (Tabla 6). El cártamo, tuvo valores de TA y VA similares a triticale, pero secó completamente el perfil de suelo (Fig. 8) principalmente por una mayor duración del ciclo (Tabla 4).

A partir de las ecuaciones que ajustan la VA de cada especie (Fig. 5), se puede estimar la profundidad en que se encontraban las raíces para un período de 20 d antes y 20 d después de floración, y consecuentemente observar el contenido de agua útil en esa capa

de suelo (Fig. 9). De esta manera se puede conocer el estado hídrico del cultivo en esa fase crítica de determinación del rendimiento. El garbanzo fue el cultivo que mantuvo el porcentaje de agua útil, durante el período alrededor de floración, por encima del 50%. El resto de los cultivos inició la etapa con un 54% de agua útil en promedio, siendo el valor final de 8, 18, 29, 33 y 35% para cártamo, colza, triticale, arveja y trigo respectivamente (Fig. 9). Como se desprende de este análisis, el garbanzo fue el cultivo que tuvo una mejor condición hídrica alrededor de floración y en consecuencia el que dejó mayor proporción de agua para la etapa de llenado de granos. El caso contrario fue el cártamo, quien agotó casi completamente las reservas de agua, comprometiendo mucho más la etapa posterior de llenado de granos. Estas características diferenciales en la partición del consumo entre los períodos alrededor y posterior a la floración pueden explicar algunas diferencias en la producción de la biomasa entre destinos vegetativos y reproductivos y serán abordados en la sección siguiente.

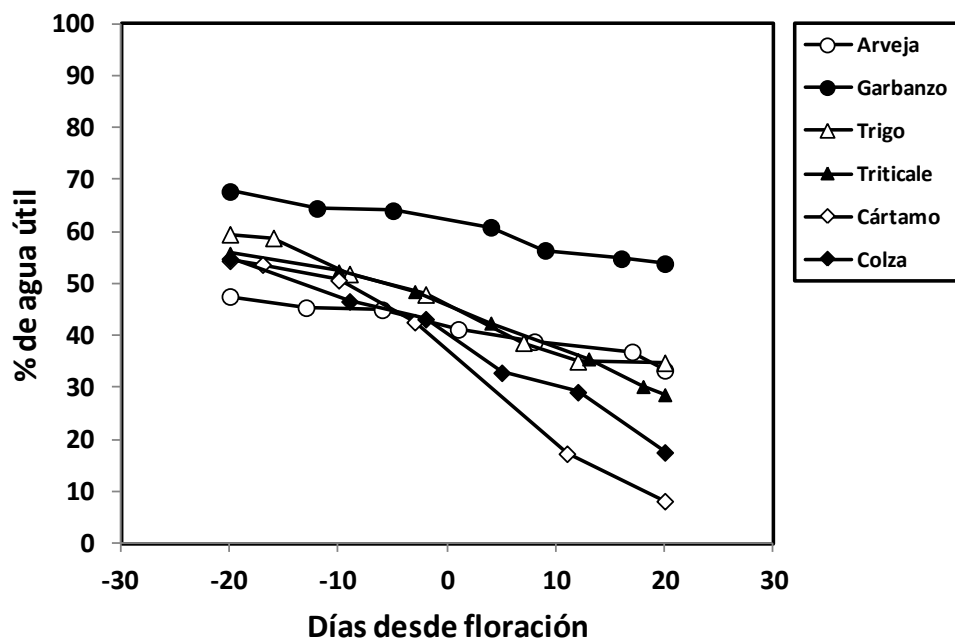


Figura 9: Porcentaje de agua útil para la capa explorada por las raíces en un período de -20 a +20 días alrededor de floración de cada especie. La profundidad de la capa de suelo explorada por las raíces entre -20 y +20 días alrededor de floración de cada especie surge a partir de las ecuaciones de VA (cm d^{-1}) de la Fig. 5. La capa analizada para cada especie

fue de 80 a 160 cm para arveja, 90 a 190 para garbanzo, 100 a 240 cm para triticale, 120 a 230 para trigo, 170 a 260 para cártamo y 160 a 240 para colza.

Por otra parte, el contenido de agua con que quedó el perfil del suelo al finalizar el ciclo de cada cultivo puede ser utilizado como un indicador de la viabilidad que tiene cada especie en secuencia con cultivos estivales. Desde este punto de vista, la arveja fue la especie que mayor contenido de agua útil dejó en el perfil de suelo, y dada su menor duración de ciclo permitiría un mayor periodo de recarga del perfil antes de la siembra de un cultivo estival. Estos resultados son coincidentes con estudios realizados por Andrade (2010), quien encontró que el cultivo doble de arveja/maíz fue más productivo respecto a otros sistemas intensificados que involucraban especies invernales como trigo, cebada o colza. Esto se debió a que la arveja por su bajo consumo y menor ciclo, dejó mayor contenido de agua en el perfil de suelo. El cártamo fue el que dejó el suelo completamente seco hasta una profundidad de al menos 2,6 m, esta característica sumada a su mayor duración de ciclo, afectarían de manera más negativa al cultivo de segunda, dado el escaso tiempo entre la cosecha y la siembra del cultivo estival, lo cual no permitiría una adecuada recarga del perfil, y en consecuencia el cultivo siguiente sería más dependiente de las precipitaciones durante la estación de crecimiento. Una segunda alternativa como cultivo antecesor a uno estival, sería el garbanzo, el cual dejó un poco menos de agua que arveja, pero más que trigo, triticale y colza.

Por lo tanto, el orden de las especies en función del mayor al menor contenido residual de agua al final del ciclo fue, arveja > garbanzo > trigo = triticale = colza > cártamo. Esto puede observarse con mayor claridad en la Fig. 10 donde se aprecia la variación en el porcentaje de agua útil del suelo para el estrato de 0,6 a 2,6 m de profundidad desde la siembra.

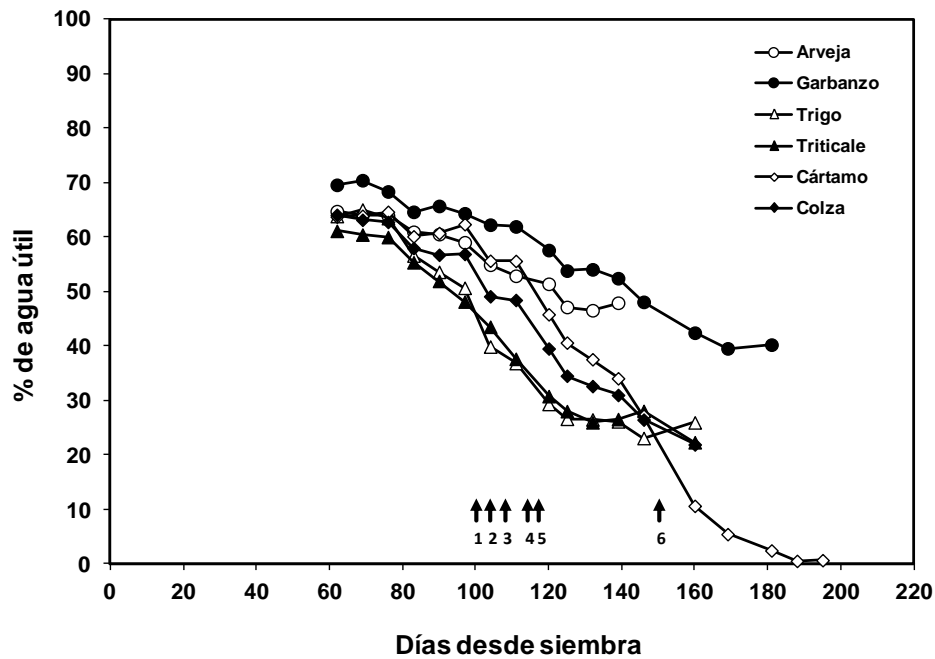


Figura 10. Porcentaje de agua útil para la capa de suelo de 0,6 a 2,6 m de profundidad en función del tiempo desde la siembra. Las flechas indican el momento de floración para colza (1); arveja (2); triticale (3); trigo (4); garbanzo (5); y cártamo (6).

Como consecuencia de estas estrategias o patrones de absorción de agua, el consumo total fue menor en arveja y mayor en cártamo, siendo intermedios para colza, triticale, trigo y garbanzo (Fig. 11).

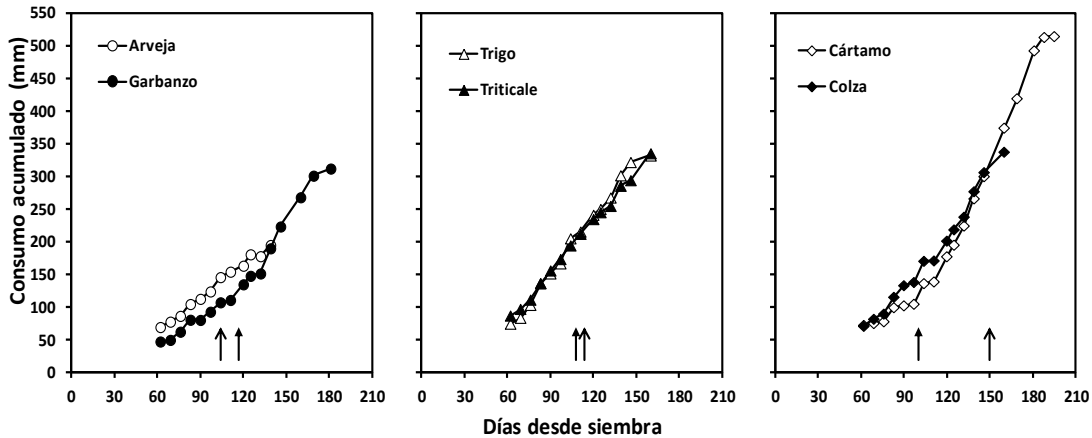


Figura 11. Consumo acumulado de agua (mm) en función de los días desde la siembra para arveja, garbanzo, trigo, triticale, cártamo, colza. La flecha vacía indica el día de floración para arveja, trigo y cártamo, y flecha llena la de garbanzo, triticale y colza.

Si bien la TA y VA de garbanzo es mayor que arveja, garbanzo tuvo siempre un mayor contenido de agua útil que arveja alrededor de floración (Fig. 9), esto se debe a que el consumo y la dinámica de generación de cobertura por el canopeo es más lenta en garbanzo que arveja, alcanzando la máxima fracción de interceptación más tarde que la arveja (Fig. 12).

La manera en que se realizó el consumo, considerando los períodos de pre y posfloración, fueron diferentes entre especies y pueden observarse en la Fig. 11. La arveja, el trigo, el triticale y el cártamo consumieron más de la mitad del agua en el período de prefloración (75, 65, 63 y 58% respectivamente), mientras que en colza y garbanzo el consumo fue mayor durante el período posfloración (59 y 57% respectivamente).

3.8 Peso seco del cultivo, rendimiento y eficiencia de uso de la radiación y agua

3.8.1 Peso seco del cultivo, radiación interceptada y eficiencia de uso de la radiación

El cultivo que mayor biomasa produjo fue el cártamo, mientras que el de menor producción fue la arveja, siendo la biomasa del resto de los cultivos intermedia (Tabla 10).

Tabla 9. Peso seco total del cultivo a madurez (PST); radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada a madurez fisiológica (IRFA); eficiencia de uso de la radiación (EUR); consumo acumulado de agua (C), eficiencia de uso del agua expresada en función del peso seco total del cultivo (EUA_{PST}), rendimiento en grano (0% de humedad; RG); índice de cosecha (IC), eficiencia de uso del agua expresada en función del rendimiento en grano (EUA_{RG}) y en términos del costo energético del grano (EUA_{RGgl}) para cada especie.

Especie	PST (kg ha ⁻¹)	IRFA (Mj m ⁻²)	EUR (g MJ ⁻¹)	¹ C (mm)	¹ EUA_{PST} (kg mm ⁻¹)	RG (kg ha ⁻¹)	IC (%)	¹ EUA_{RG} (kg mm ⁻¹)	¹ EUA_{RGgl} (kg gl mm ⁻¹)
Arveja	3983	414	1,0	195	23,7	1080	27	6,6	10,3
Garbanzo	8787	394	2,2	312	29,3	3942	45	13,4	20,7
Trigo	10336	482	2,2	333	30,4	3601	35	10,4	14,5
Triticale	11286	520	2,2	336	32,6	4137	37	11,7	16,3
Cártamo	18342	678	2,6	515	34,4	4142	23	6,7	13,0
Colza	7611	483	1,6	338	21,7	2386	31	6,6	15,4
DMS _{0,05}	2010	74	0,4	20	ns	1540	8	6,0	ns

¹: Valores promedio calculados sobre dos repeticiones, ver Materiales y Métodos.
ns: diferencias estadísticas no significativas (p>0,05)

El peso seco total, en relación a la biomasa del cártamo, fue del 22% para arveja, 41% para colza, 48% para garbanzo, 56% para trigo 62% para triticale (Tabla 10). Estas diferencias están asociadas a la distinta longitud del ciclo (Tabla 4), al consumo de agua (Fig. 11; Tabla 10) y a la cantidad y eficiencia de uso de la radiación interceptada (Tabla 10). Tanto el consumo (C) de agua total, como la IRFA, se relacionaron significativa y positivamente con el PST ($R^2=0,93$, $p<0,05$ y $R^2=0,82$, $p<0,05$). Para ambos recursos, el C y la IRFA fueron menores para arveja y garbanzo, intermedios en colza trigo y triticale y superior en cártamo (Tabla 10).

En la Fig. 12 puede apreciarse la fracción de intercepción de radiación desde la emergencia para cada especie. La captura de radiación solar es una función de la generación de área foliar. En el caso de garbanzo y el cártamo, durante las fases tempranas del desarrollo se lograron bajos valores de intercepción, y particularmente el garbanzo no alcanzó valores muy superiores al 50% al momento de floración. Por el contrario, la mayor duración de ciclo del cártamo le permite alcanzar mayores valores que garbanzo en dicho

momento (Fig. 12). El resto de las especies lograron altos valores de intercepción alrededor del momento de floración (Fig. 12). Esta dinámica en la generación del canopeo pueden explicar las diferencias encontradas en el consumo de agua en pre y posfloración. En el caso de garbanzo, como se analizó anteriormente, el consumo de agua fue mayor en el período posfloración (Fig. 9 y 11).

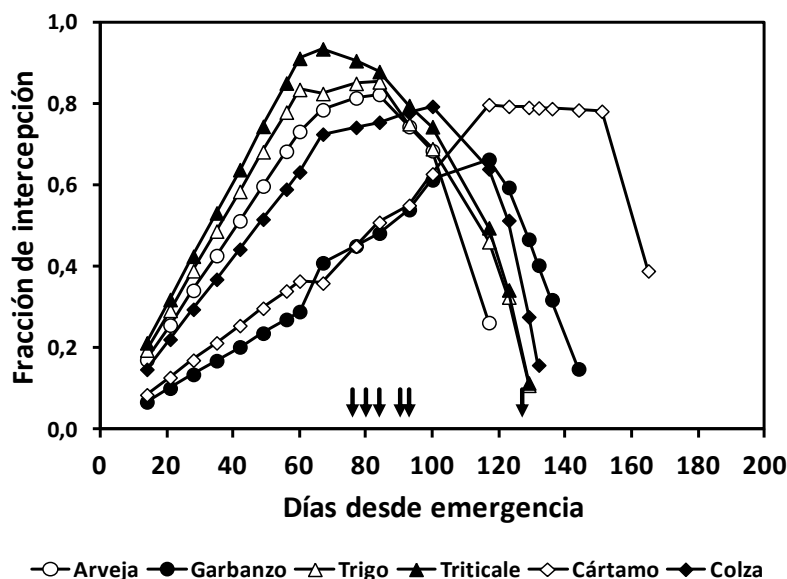


Figura 12. Fracción de intercepción de luz en función de los días desde la siembra. En orden de aparición de izquierda a derecha las flechas corresponden a la fecha de floración de colza, arveja, triticale, trigo, garbanzo y cártamo.

EUR varió desde 1,0 a 2,6 g Mj⁻¹, siendo menor para arveja y colza, intermedia para trigo, triticale y garbanzo, y mayor para cártamo (Tabla 10). Las EUR encontradas en este estudio para garbanzo, arveja, trigo y cártamo estuvieron entre los valores reportados en la literatura (Tula *et al.*, 2016; Tesfaye *et al.*, 2006; Andrade, 2010; O' Connell *et al.*, 2003; Sinclair y Muchow, 1999; Cavero *et al.*, 1999). En el caso de colza la EUR fue menor a la registrada por Andersen *et al.* (1996) y mayor a la reportada por Andrade (2010) en tres localidades de Buenos Aires (Argentina).

3.8.2 Rendimiento e índice de cosecha

En cuanto al rendimiento en grano (RG) se encontraron diferencias significativas entre especies. Las que obtuvieron mayor RG fueron cártamo, triticale, garbanzo y trigo, y los de menor colza y arveja (Tabla 10). También se hallaron diferencias en el índice de cosecha (IC), siendo el garbanzo la especie de mayor IC, mientras que triticale, trigo y colza presentaron valores intermedios y la arveja y cártamo fueron las de menos valor (Tabla 10). El RG estuvo más asociado con el PST ($R^2=0,60$; $p=0,06$), no así con el IC ($R^2=0,15$; $p=0,46$).

3.8.3 Eficiencia de uso del agua

Si bien el rango de variación en la EUA_{PST} fue del orden del 37% (Tabla 10), no se encontraron diferencias estadísticamente significativa entre especies. Sin embargo, la EUR explicó un 76% de la variación en EUA_{PST} ($p<0,05$), lo que demuestra que los cultivos de mayor EUR también fueron los de mayor EUA_{PST} (Tabla 10). Por su parte, la EUA_{RG} tuvo un rango de variación del orden del 50% (entre 6,6 y 13,4 $kg\ mm^{-1}$), siendo el valor más alto el obtenido para garbanzo (Tabla 10). La mayor EUA_{RG} de esta especie es el resultado de su mayor partición hacia destinos reproductivos (IC) respecto al resto de los cultivos (Tabla 10). Estos resultados concuerdan con un estudio realizado en garbanzo por Tula *et al.*, (2016) en el norte de la provincia de Córdoba. En el caso particular de trigo, Martellotto *et al.*, 2005 y Abbate *et al.*, 2004 también encontraron en estos ambientes, valores de EUA_{RG} y EUA_{PST} , coincidentes a los reportados en este trabajo. Para el resto de las especies evaluadas no se hallaron estudios sobre EUA realizados en Argentina; y en la literatura internacional la EUA_{RG} citada varía marcadamente, con valores que van desde 3,7 (Anderson *et al.*, 2003) hasta 7,2 $kg\ mm^{-1}$ (Johnston *et al.*, 2002) para cártamo, desde 4,5 hasta 11,4 $kg\ mm^{-1}$ para colza (Johnston *et al.*, 2002) y desde 2,2 (Huang *et al.*, 2003) hasta 10,0 $kg\ mm^{-1}$ (Siddique *et al.*, 2001) para arveja. Este gran rango de variación posiblemente se deba a diferencias en las condiciones climáticas entre ambientes (i.e. temperatura, humedad relativa, déficit de presión de vapor) como lo establecieron para trigo Abbate *et al.* (2004).

Puesto que la comparación en la EUA_{RG} contempla granos de diferente calidad (distinta composición en hidratos de carbono, proteínas y lípidos), la EUA_{RG} corregida por el costo energético del grano (EUA_{RGgl}) no mostró diferencias estadísticamente significativas entre especies ($p= 0,20$) (Tabla 10).

A modo de resumen se presenta en la Tabla 11 la variación porcentual de cada variable analizada para cada una de las especies evaluadas. Puede observarse que existe una gran gama de combinación de variables que pueden utilizarse para explicar las diferencias entre especies tanto en el consumo de agua como en la producción de materia seca y rendimiento en grano.

Tabla 10: Variación porcentual respecto al mayor valor de cada variable (100%) para cada especie. Ciclo desde siembra a madurez (Ciclo), velocidad de avance del frente radical (VA), profundidad máxima de enraizamiento (PE), tasa de absorción de agua (TA), consumo total de agua (C), agua útil residual a madurez (AU residual), radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada a madurez (IRFA), eficiencia de uso de la radiación (EUR), peso seco total del cultivo a madurez (PST), rendimiento en grano (RG), eficiencia de uso del agua para peso seco total (EUA_{PST}), eficiencia de uso del agua para rendimiento (EUA_{RG}) y eficiencia de uso del agua de acuerdo al costo energético del rendimiento (EUA_{RGgl}).

Variable	Trigo	Triticale	Colza	Cártamo	Garbanzo	Arveja
Ciclo	80	80	82	100	90	71
VA	74	100	83	94	71	51
PE	92	92	92	100	92	62
TA	100	76	96	87	38	27
C	65	65	66	100	61	38
AU residual	54	46	46	1	84	100
IRFA	71	77	71	100	58	61
EUR	85	85	62	100	85	38
PST	56	62	41	100	48	22
IC	78	82	69	51	100	60
RG	87	100	58	100	95	26
EUA_{PST}	88	95	63	100	85	69
EUA_{RG}	78	87	49	50	100	49
EUA_{RGgl}	70	79	74	63	100	50

En general, dentro de una fila diferencias menores al 15% no fueron estadísticamente diferentes.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio analizó los procesos y relaciones causales que determinan el consumo y la eficiencia de uso del agua en diferentes especies invernales, a través de la caracterización del patrón de absorción de agua dado por la velocidad de profundización de raíces, la profundidad máxima que alcanzan las raíces y la tasa de absorción de agua. El cártamo tiene el mayor consumo de agua, producto de su mayor longitud de ciclo y alta capacidad de exploración radical del perfil de suelo en profundidad y tasa de absorción de agua. La arveja es la que menos agua consume, debido a su ciclo más corto, menor profundización de las raíces y menor tasa de absorción diaria de agua. En consecuencia el cártamo es el cultivo que dejó menos agua residual en el suelo al alcanzar la madurez. El resto de las especies tienen valores intermedios entre estos cultivos.

Respecto a la producción de biomasa, el cártamo produce el mayor peso seco total debido a la mayor duración de ciclo, captura y eficiencia de uso de la radiación solar. Por el contrario, la arveja es la de menor producción de biomasa, debido a que por su menor duración de ciclo capturó menos luz y además es la especie de menor eficiencia de uso de la radiación. El resto de las especies tienen valores intermedios entre cártamo y arveja. Por su parte, el rendimiento es mayor en trigo, triticale, cártamo y garbanzo, mientras que el rendimiento más bajo es el de arveja, y la colza presenta un valor intermedio entre el primer grupo y la arveja. Se destaca el alto índice de cosecha de garbanzo, el cual posiblemente está asociado en la manera que consume el agua, puesto que es el cultivo que mejor estado hídrico tiene durante el período crítico de determinación del rendimiento y pospone la mayor proporción del consumo de agua hacia el período de llenado de granos. En contrapartida el cártamo tiene el menor índice de cosecha y es el cultivo que consume la mayor proporción del agua en la etapa de prefloración. El resto de las especies tienen valores intermedios de índice de cosecha entre estos dos cultivos.

Los cultivos de mayor EUA_{PST} son los de mayor EUR. La eficiencia de uso del agua para el peso seco total del cultivo es mayor en cártamo y menores para colza y arveja. Los de menor EUA_{RG} son los cultivos de colza, arveja y cártamo. La mayor EUA_{RG} de garbanzo se asocia con su mayor índice de cosecha.

En base a los resultados presentados se acepta la primera hipótesis de este trabajo, ya que las especies estudiadas presentan diferentes patrones de absorción de agua en el perfil del suelo, caracterizado por la velocidad de avance del frente de absorción radical, la profundidad máxima de enraizamiento y la tasa de absorción diaria. Como consecuencia de esto también se acepta la segunda hipótesis puesto que las especies estudiadas presentan diferencias en el consumo de agua y diferencias en el uso del agua.

Los resultados presentados en este trabajo resultan de interés académico y de aplicación agronómica. El conocimiento de las estrategias que utiliza cada especie para consumir agua ayuda a la toma de decisiones acerca del manejo de cada especie cuando interviene en un sistema intensificado y diversificado, al igual que permite conocer la eficiencia en el uso del recurso de tal manera de poder comprender el impacto productivo en el sistema. Entre estos, el uso de leguminosas en rotación con gramíneas puede reducir la necesidad de fertilizantes nitrogenados, reducir la presencia de enfermedades y mejorar el balance de carbono del suelo y calidad de la materia orgánica.

Entre los estudios que se desprenden a futuro de acuerdo a estos resultados surge como importantes: a) profundizar los estudios respecto a la variabilidad genética dentro de cada especie en las variables que caracterizan el patrón de absorción, el consumo de agua y la eficiencia de uso del agua analizar; b) el tipo y calidad de los residuos a cosecha de las especies invernales; c) el estado nutricional del suelo a cosecha y la disponibilidad de nutrientes para el cultivo siguiente; d) manejo sanitario de algunas especies de alta sensibilidad a enfermedades como garbanzo y arveja; e) para situaciones de manejo con riego suplementario probar la sensibilidad de cada especie ante diferentes umbrales de riego.

BIBLIOGRAFÍA

Abbate P E y Cantarero M G. 2001. Efectos del estrés hídrico en trigo. Conferencia. Actas V Congreso Nacional de Trigo y III Simposio Nacional de Siembra Otoño – Invernal. Carlos Paz, Córdoba.

Abbate P.E. 2004. Agroclima: a program for calculating evaporation by the FAO Penman-Monteith method from spreadsheets or programming languages (In Spanish). In G.

- Murphy, editor. Proceedings of the 10th Argentina and 4th Latin American Meeting of Agrometeorology. Mar del Plata, Argentina. 13-15 Oct. Paper 238.
- Abbate P. E., Dardanelli J. L., Cantarero M. G., Maturano M., Melchiori R. J. M. and Suero E. E. 2004. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *Crop Sci.*, vol. 2, N° 44., pp 474-483.
- Aguirre A., Badiali O. J., Cantarero M.G., León A., Ribotta P. and Rubiolo, O. 2002. Relationship of test weight and kernel properties to milling and baking quality in argentine triticales. *Cereal Research Communications*, pp 203 - 208.
- Alessi J., Power J. F. and Zimmerman D. C. 1981. Effects of Seeding Date and Population on Water-Use Efficiency and Safflower Yield 1. *Agron. J.*, 73(5):783-787.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes, D. and Smith M. 1998. Reference evapotranspiration (ET_o). In *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO, Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy. pp. 15–86.
- Andersen M. N., Heidmann T., Plauborg F. 1996. The effects of drought and nitrogen on light interception, growth and yield of winter oilseed rape. *Acta Agriculturae Scandinavica B-Plant Soil Sciences*, 46(1), 55-67.
- Anderson R. L., Tanaka D. L., and Merrill S. D. 2003. Yield and water use of broadleaf crops in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*. 58(3):255-266.
- Andrade J.F. 2010. Intensificación de los sistemas de producción de grano en la Región Pampeana: productividad y uso de los recursos. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires, Argentina. pp 176.
- Andrade F.H. 2011. La tecnología y la producción agrícola. El pasado y los actuales desafíos. INTA Balcarce. Ediciones INTA. EEA Balcarce, Centro Regional Buenos Aires Sur.
- Andrade J., Ermácora M. y Satorre, E. 2013. La productividad y uso de la radiación de soja en sistemas de doble cultivo en la Pampa ondulada. II Workshop Internacional de Ecofisiología de Cultivos. Mar del Plata.

- Araus J. L., Slafer G. A., Reynolds M. P., and Royo, C. 2002. Plant breeding and drought in C3 cereals: what should we breed for?. *Annals of botany*, 89 (7). pp 925-940.
- Araus J. L., Slafer G. A., Conxita R., and Serret D. M. 2008. Breeding for Yield Potential and Stress Adaptation in Cereals. *Critical Reviews in Plant Science*, 27:377–412. ISSN: 0735-2689 print / 1549-7836 online.
- Badiali O. J., Rolando R.O., Lovey R. J., Almandoz M. C. y Yacci M. R. 1991. Producción forrajera de triticales argentinos en relación a otros cereales de invierno en la región semiárida central. *Agriscientia*: 8 - 71-74.
- Begg J. E. and Turner N. C. 1976. Crop water deficits. In *Advances in agronomy*. Academic Press. 28. pp. 161-217.
- Biscoe P. V. and Gallagher J. N. 1977. Weather, dry matter production and yield. In *Environmental Effects on Crop Physiology*. Simposio Long Ashton.
- Borrás L., Slafer G.A. and Otegui M.E. 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative appraisal. *Field Crop Res.*, 86:141-146
- Cantarero M. G. y Luque, S. F. 2007. Programador de Siembra de trigo (progsit v. 2.0) una herramienta para hacer eficiente el uso de los recursos. *Revista ¿? Vol? N°?.* pp 4 – 5??.
- Cantarero M. G., Dardanelli J. L., De Luca M., Collino D., Abbate P. E y Racca, R. 2008. Patrones de absorción de agua edáfica en diferentes cultivares en trigo en un suelo Haplustol Típico. XIII Reunión Latinoamericana y XXVII Reunión Nacional de Fisiología. pp 57.
- Cantarero M. G. y Luque, S. F. 2008. Criterios para una correcta elección de la fecha de siembra. *Aplicaciones del programador de siembra progsit v. 2.0*.
- Carfagno P. 2008. Cultivos de Cobertura en Agricultura de Secano en Región Pampeana. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Instituto de suelos INTA Castelar.
- Cavero J., Plant, R. E., Shennan C., Friedman, D. B., Williams, J. R., Kiniry, J. R. and Benson, V. W. 1999. Modeling nitrogen cycling in tomato–safflower and tomato–wheat rotations. *Agricultural systems*, 60(2), 123-135.

- Caviglia, O.; Andrade, F. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas. Capture and use efficiency of environmental resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology* 3: 1 – 8.
- Dardanelli J. L.; De la Casa A. C.; Ateca M. R.; Zamvetor R.; Nuñez Vazques F.; Salas H. P. 1992. Validación del balance hidrológico versátil para la sucesión sorgo – soja bajo dos sistemas de labranza. *Rev. Agr. de Manfredi y Marcos Juarez, Argentina*, 7: 20 – 29.
- Dardanelli J. L., Bachmeier O., Sereno R., Gil R. 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustol. *Field Crops Res.* 54, 29 – 38.
- Dardanelli J.L., Collino D.J., Otegui M. E., y Sadras V.O.2003.Bases funcionales para el manejo de agua en los sistemas de los cultivos de granos. p 375 – 440, *In Satorre E. H. et al.*,eds. Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad de Agronomía, UBA., Bs. As.
- Dardanelli J.L., Ritchie J.T., Calmon M., Andreani J. M., Collino, DJ. 2004. An empirical model for root water uptake. *Field Crops Res.* 87: 59 – 71.
- De Vries, F. P., Brunsting, A. H. M., and Van Laar, H. H. 1974. Products, requirements and efficiency of biosynthesis a quantitative approach. *Journal of theoretical Biology*, 45(2), 339-377.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. 2008. InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Doorenbos J., Pruitt W. O. 1977. Crop Water Requirements. *Irrigation and Drainage paper*, (24), p. 144.
- de Wit, C. T. 1958. Transpiration and crop yields. N° 64.6. 's-Gravenage – Holanda. pp 88.
- Edgerton M. 2009. Increasing crop productivity to meet global needs for feed, food, and fuel. *Plant Physiology* 149: 7 – 13.

- Estimaciones agrícolas – Ministerio de agroindustria. Publicado en internet, disponible en: <https://datos.agroindustria.gob.ar/dataset/estimaciones-agricolas>. Activo Octubre, 2018.
- FAO. 2009. How to Feed the World in 2050. Publicado en internet, disponible en http://www.fao.org/fileadmin/template/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf. Activo Abril 2018.
- Faraji A., Latifi N., Soltani A., Rad, A. H. S. 2009. Seed yield and water use efficiency of canola (*Brassica napus* L.) as affected by high temperature stress and supplemental irrigation. *Agricultural Water Management*, (96), N° 1. pp 132-140.
- Giayetto O., Fernandez E. M., Asnal W. E., Cerioni G. A., Cholaky L. 1999. Comportamiento de cultivares de cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) en la región de Río Cuarto, Córdoba (Argentina). *Revista de Investigación Agrária, Produccion y Proteccion Vegetales*. (14). pp 1-2.
- Hatfield J., Boote K., Kimball B., Ziska L., Izaurralde R., Ort D., Thomson A., Wolfe D. 2001. Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production. *Agron. J.* 103:351-370.
- Huang M., Shao M., Zhang L., and Li Y. 2003. Water use efficiency and sustainability of different long-term crop rotation systems in the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, 72(1), 95-104.
- Hunt R., Warren Wilson J., Hand D. W. 1990. Integrated Analysis of Resource Capture and Utilization. *Annals of Botany*. 6 (65). pp 643–648.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. Climate change 2007: the physical science basis (summary for policy makers). Disponible en internet <http://www.ipcc.ch>. IPCC. Fourth Assesment Report. Activo Abril 2018.
- Jensen M. E., Burman R. D., Allen R. G. 1990. Evaporation and irrigation water requirements. *ASCE Manuals and Reports on Eng. Practices No. 70*. Am. Soc. Civil Eng., New York, NY. pp 978

- Johnston A, Tanaka D, Miller P, Brandt S, Nielsen D, La Found G and Riveland R. 2002. Oilseed crops for semiarid cropping systems in the northern Great Plains. *Agron. J.* 94:231-240.
- Khurana S. C., McLaren J. S. 1982. The influence of leaf area, light interception and season on potato growth and yield. *Potato Research*, 25 (4). pp 329-342.
- Knott C. M. 1987. A key for stage of development of the pea (*Pisum sativum* L.). *Ann. Appl. Biol.* 111, 233–244.
- Lancashire P. D., Bleiholder H., Boom T. V. D., Langelüddeke P., Stauss R., Weber E. Witzemberger A. 1991. A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann appl biol.* (119), 3. pp 561-601.
- Lang M. 2011. El cultivo de cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) en la región semiárida pampeana: ensayo comparativo de rendimiento. *Revista de la Fac. de Agronomía. UNL. Pam. Argentina.* (22). ISSN: 0326-6184.
- Magrin G. 2007. Pronostico de cambio climático en la región Pampeana y extra pampeana. Seminario taller: Estrategias de mejoramiento frente a nuevas demandas del sistema productivo en cereales y oleaginosas. INTA. Buenos Aires, 30 y 31 de marzo 2007.
- Martellotto E., Salinas A., Salas PH., Lovera E., Giubergia JP., Capuccino V., Lopez C., Signorile O., Lingua S., Alvarez, C., Cantarero M., Viotti G. 2005. Un aporte a la sustentabilidad de los sistemas productivos. Evaluación de cultivares y estrategias de manejo en 8 localidades de la Provincias de Córdoba. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Boletín N°9. E.E.A INTA Manfredi – Área de Recursos Naturales y Agronomía. Proyectos Regionales de Agricultura Sustentable.
- Miralles D., González F., Abeledo L., Serrago R., Alzueta I., García, G. 2014. Manual de trigo y cebada para el Cono Sur: procesos fisiológicos y bases de manejo. 1a ed. Editora: Orientación Gráfica, Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1922-07-9. pp 56.
- Monteith J. L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of applied ecology.* (9), 3. pp. 747-766.

- Monteith J. L., Moss C. J. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, 281(980), 277-294.
- Monteith J. L. (1986). How do crops manipulate water supply and demand?. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 316(1537), 245-259.
- Montoya Coronado, L. 2010. El cultivo de cártamo (*carthamus tinctorius* L.) en México. INIFAP, Campo Experimental Norman Borlaug. Libro Técnico N°5, 98pp.
- Nanda R., Bhargava S. C., Tomar D. P. S., Rawson H. M. 1996. Phenological development of *Brassica campestris*, *B. juncea*, *B. napus*, *B. carinata* grown in controlled environment and from 14 sowing dates in the field. Field crops research. (46), 1 – 3. pp 93 – 103.
- O’Connell M. G., O’Leary, G. J., Whitfield, D. M., Connor, D. J. 2004. Interception of photosynthetically active radiation and radiation-use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment. Field Crops Research, 85(2-3), 111-124.
- Passiura J. B. 1983. Roots and drought resistance. Agr water manage. Vol. (7), 1-3. pp. 265-280.
- Passiura J. B. 1996. Drought and drought tolerance. Plant growth regul. (20), 2. pp. 79-83.
- Prieto G., Amado R., Brassesco R., Buschittari D., Espósito A., Gerster G., Martínez S., Martins L., Albrecht R., Suter A., Vita E., Vizgarra, O. 2013. Rendimiento de cultivares de Arveja (*Pisum sativum* L) en diferentes ambientes de la República Argentina. Revista: Para mejorar la producción. AER INTA Arroyo Seco. Publicado en internet, disponible en: <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-resultados-red-cultivares-arveja-2013-2014.pdf>. Activo abril de 2018.
- Rosenkjaer M. 2016. 3ª Jornada Nacional de Legumbres. Publicado en internet, disponible en: inta-jornada-legumbres.2016-ano-internacional-legumbres.importancia-para-argentina-y-el-mundo.rosenkjaer.pdf. Rosario, 3 de Junio 2016.
- Severina I. 2012. La funcionalidad de los sistemas radicales y su aplicación para optimizar el uso del Balance Hídrico. III Reunión Internacional de Riego – Rendimientos potenciales con uso eficiente de agua e insumos. INTA EEA. Manfredi. 8 – 19.

- Siddique K.H.M., Regan K.L., Tennant D., Thomson B.D. 2001. Water use and water use efficiency of cool season grain legumes in low rainfall Mediterranean-type environments. *European Journal of Agronomy*. (15), 4. pp 267 – 280
- Sinclair T. R., de Wit C.T. 1975. Photosynthate and nitrogen requirements for seed production by various crops. *Science*. (189), 4202. pp. 565-567.
- Sinclair T. R., Muchow R. C. 1999. Radiation use efficiency. *Advances in agronomy*. (65). pp 215-265.
- Singh P. 1991. Influence of water-deficits on phenology, growth and dry-matter allocation in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Field Crops Res*. 28: 1-15.
- Squire G. R., Marshall B., Terry A. C., Monteith J. L. 1984. Response to Temperature in a Stand of Pearl Millet: VI. Light interception and dry matter production. *Journal of Experimental Botany*. (35), 4. pp 599–610. Publicado en internet, disponible en: <https://doi.org/10.1093/jxb/35.4.599>.
- Soil Survey Staff. 2003. *Keys to Soil Taxonomy*. 9th edition. Washington, DC: USDA and Natural Resources Conservation Service.
- Stockle C. O., Kiniry J. R. 1990. Variability in crop radiation-use efficiency associated with vapor-pressure deficit. *Field crop res*. (25), 3-4. pp. 171-181.
- Tesfaye K., Walker S., Tsubo M. 2006. Radiation interception and radiation use efficiency of three grain legumes under water deficit conditions in a semi-arid environment. *European journal of Agronomy*. 25:1, 60-70.
- Toledo R. 2016. *Ecofisiología de Garbanzo. El cultivo de garbanzo (Cicer arietinum L.) en Argentina*. 1° edición. Córdoba, Argentina. Editorial Universidad Nacional de Córdoba. ISBN: 978 – 950 – 33 – 1251 – 3. pp, 89-114.
- Tula A. A., Dragneff Mortcheff E., Luque S. F., Cantarero M. G. 2016. Estrategias de riego en el cultivo de garbanzo: eficiencia de captura y uso de la radiación y agua, producción de biomasa y rendimiento. *El cultivo de garbanzo (Cicer arietinum L.) en Argentina*. 1° edición. Córdoba, Argentina. Editorial Universidad Nacional de Córdoba. ISBN: 978 – 950 – 33 – 1251 – 3. pp 505 – 522.

UN. 2008. United Nations Population division. World population prospects. The 2008 revision. Publicado en internet, disponible en: <http://www.un.org/esa/population>. Activo abril de 2018.

UNEP Annual Report for 2002. Publicado en internet, disponible en: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle. UNEP Annual Evaluation Report 2002](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/UNEP%20Annual%20Evaluation%20Report%202002). Activo Abril de 2018. pp 89.

Weber E., Bleiholder H. 1990. Explanations of the BBCH decimal codes for the growth stages of maize, rape, faba beans, sunflowers and peas-with illustrations. Gesunde Pflanz. (42),9. pp 308-321.

Zadoks J. C., Chang T. T., Konzak, C. F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. Weed res. (14), 6. pp. 415-421.