

Universidad Nacional de Río Cuarto
Facultad de Agronomía y Veterinaria

Trabajo Final

CONSUMO DE AGUA DEL CULTIVO DE
MAIZ Y MARCO DE PLANTACION

Alumno: SEBASTIAN ORDOÑEZ SILVANI

Director: ING. AGR. M.Sc GABRIEL ESPOSITO

Río Cuarto – Córdoba
Diciembre 2007

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMIA Y VETERINARIA**

“Trabajo Final presentado para optar al Grado
de Ingeniero Agrónomo”

**CONSUMO DE AGUA DEL CULTIVO DE MAIZ Y
MARCO DE PLANTACION**

**Alumno: SEBASTIAN ORDOÑEZ SILVANI
DNI: 26972757**

Director: Ing. Agr. M.Sc Gabriel Espósito

**Río Cuarto – Córdoba
Diciembre 2007**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título del Trabajo Final: “Consumo de agua del cultivo de maíz y marco de plantación”

**Autor: Ordoñez Silvani, Sebastian
DNI: 26972757**

Director: Ing. Agr. M.Sc Gabriel P. Espósito

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Jurado Evaluador:

Edgardo Zorza _____

Miguel Di Renzo _____

Teresa Caminos _____

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Aprobado por Secretaría Académica: ____/____/____.

Secretario Académico

Agradecimientos:

A mi familia que siempre me brindó apoyo y contención, permitiendo que este sueño se convierta en realidad; a Jorge, Gabriel, Carlos y Ricardo de la cátedra de cereales de la Universidad Nacional de Río Cuarto por su predisposición y empuje; a Adolfo, Diego, Franco, Germán y Sabino que de alguna forma colaboraron conmigo para ayudar a cumplir con éxito el presente trabajo y a Lucre que también aportó su granito de arena.

ÍNDICE DEL TEXTO

Resumen.	VII
Summary	VIII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	4
1.2. Hipótesis	7
1.3. Objetivos	7
2. Materiales y métodos	8
2.1. Descripción general del ensayo	8
2.2. Descripción de las determinaciones realizadas	9
2.2.1. Evolución de la humedad edáfica	9
2.2.2. Índice de área foliar	9
2.2.3. Determinación de la biomasa aérea total producida por el cultivo	9
2.2.4. Cálculo del consumo de agua	9
2.2.5. Cálculo de las eficiencias en el uso del agua	11
2.2.6. Determinación del rendimiento	11
2.3. Análisis de la información experimental	11
3. Resultados y Discusión	12
3.1. Fenología, precipitaciones	12
3.2. Evolución del contenido hídrico total hasta 120 cm de profundidad	13
3.3. Consumo de agua y evapotranspiración real del cultivo	15
3.4. Índice de área foliar	17
3.5. Producción de materia seca total	19
3.6. Rendimiento y eficiencia en el uso del agua	22
4. Conclusión	25
5. Bibliografía citada	26

ÍNDICE DE TABLAS

1.	Fenología y precipitaciones durante el ciclo del cultivo	12
2.	Lámina total de agua en los primeros 120 cm del suelo (mm)	13
3.	Consumo de agua por etapas y evapotranspiración total del maíz en distintas densidades de siembra y distancias entre hileras	15
4.	Evolución del IAF del maíz en diferentes etapas del ciclo del cultivo (m^2 hojas/ m^2 suelo) según distintas distancias entre hileras y densidad de plantas.	18
5.	Materia seca total del maíz en madurez fisiológica según distintas distancias entre densidad de plantas.	20
6.	Regresión lineal entre Consumo por etapas e IAF.	21
7.	Rendimiento en grano (14,5% de humedad) según distancia entre hileras y densidad de plantas.	23
8.	Eficiencia en el uso del agua consumida (EUA) en la producción de biomasa y de rendimiento en grano	24

INDICE DE FIGURAS

1.	Precipitaciones decádicas mensuales y medias normales en Río Cuarto durante la campaña 2001-2002 y promedio (1974/06).....	13
2.	Evolución del contenido hídrico del suelo (mm) hasta los 120 cm de profundidad.	14
3.	Consumo medio diario de agua en diferentes etapas del maíz. 45000, 65000 y 85000 plantas ha ⁻¹ .	16
4.	Relación entre la biomasa seca aérea en R ₆ y el consumo de agua entre siembra – R ₆ .	22

Resumen

En el cultivo de maíz el marco de plantación, definido por la densidad de plantas y el espaciamiento entre hileras, puede tener una fuerte influencia sobre la evolución del consumo de agua del cultivo, como consecuencia del efecto sobre la disponibilidad hídrica del suelo en los momentos críticos de definición del rendimiento. Se realizó un estudio con el propósito de evaluar el efecto de la densidad de plantas y la distancia entre hileras en el cultivo de maíz sobre el consumo de agua. Se condujo en el campo experimental de la Universidad Nacional de Río Cuarto, para evaluar el efecto de tres densidades de plantas (45000, 65000 y 85000 plantas ha⁻¹) en dos distancias entre hileras (52 y 70 cm.) sobre el consumo de agua por etapas y total, la evolución del Índice de Área Foliar (IAF), la producción de biomasa y el rendimiento en granos. Los resultados obtenidos fueron analizados con ANAVA y las medias comparadas con el test DMS de Fisher (P=0.05%) mediante el programa Infostat. El consumo de agua se incrementó con el aumento de la densidad de plantas, éste efecto fue más marcado en las etapas tempranas de crecimiento del cultivo y hacia el final del ciclo, no manifestando respuesta a las diferentes distancias entre hileras. El IAF fue mayor en etapas tempranas de crecimiento para las mayores densidades al igual que en etapas tardías, mientras que la distancia entre hileras genero diferencia significativa solo alrededor de la floración. La producción de materia seca, el rendimiento en grano y la Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) no tuvieron respuesta a los factores analizados posiblemente debido a la buena disponibilidad hídrica del suelo alrededor de la floración, consecuencia de las precipitaciones ocurridas en dicho período.

Palabras claves: Maíz, consumo de agua, marco de plantación, período crítico, rendimiento.

Summary

In corn growing, the planting pattern —defined by plant density and row spacing— may have a strong influence on the evolution of water consumption by the crop, as a consequence of its effect on the water availability of the soil in the critical moments of yield definition. A research was conducted with the purpose of evaluating the effect that plant density and row distance may have on water consumption in corn growing. The research, carried out at the experimental field of the Universidad Nacional de Río Cuarto, aimed at evaluating the effect of three plant densities (45000, 65000 and 85000 plants ha⁻¹) and two row distances (52 cm and 70 cm) on water consumption by stage and overall, as well as on the evolution of the Leaf Area Index (LAI), biomass production, and grain yield. The results were subjected to the Analysis of Variance (ANOVA) and the mean values compared to the Fisher LSD test (P=0.05%) using the Infostat software. Water consumption increased at higher plant density; this effect was more marked in the early growing stages of the crop and by the end of the cycle. There was no response as for the difference in row spacing. The LAI was higher for higher densities both in early and late growing stages, while row distance generated a significant difference only around the flowering period. Dry matter production, grain yield and water use efficiency (WUE) did not show any response to the factors analyzed possibly due to the good water availability of the soil around the flowering period, which was a consequence of the amount of rain that fell during that period.

Key words: corn, water consumption, planting pattern, critical period, yield.

1. Introducción

La producción de maíz se realiza bajo una amplia gama de condiciones climáticas, que reconoce su límite cuando se presenta una combinación de temperaturas bajas y período libre de heladas corto. Sin embargo, dentro de esta extensa región, la superficie destinada al cultivo se concentra en áreas donde las precipitaciones superan los 250 mm anuales, no existiendo producción de secano cuando las precipitaciones estivales son inferiores a 150 mm (Howell y Tolk 1998).

Las plantas de un cultivo constituyen un elemento conductor de agua ubicado entre dos extremos de potencial hídrico diferente: el suelo con potencial más alto y la atmósfera con potencial más bajo. Entre ambos extremos el agua se mueve por el aporte de energía radiativa y advectiva, que produce la evaporación desde la superficie del follaje o transpiración (T). Consecuentemente, la principal fuerza motriz que modifica el consumo de agua o evapotranspiración del cultivo (ETR) es la radiación solar incidente. La evaporación del agua desde el suelo (E) y las plantas (T) hacia la atmósfera constituye la principal forma de disipación de la energía recibida (calor latente) cuando no existen limitaciones hídricas. A lo largo del ciclo del cultivo la ETR modifica su composición, variando la proporción correspondiente a E y T (Marcos, 2001).

A medida que el cultivo crece, el aumento de su área foliar hace que sea mayor la proporción de agua transpirada desde su follaje respecto a la evaporada del suelo. Este proceso fue cuantificado por Villalobos y Ferreres (1990) para maíz con contenidos de agua de 2 mm/cm de suelo y observaron que con un $IAF \leq 0.7$, el 80 % de la evapotranspiración potencial corresponde a pérdidas de agua desde el suelo, mientras que bajo cobertura total ($IAF \geq 4-5$) este componente se reduce a menos de un 20 %.

Con respecto a la ETR, Totis de Zeljkovich y Rebella (1980) utilizando una serie de datos de 42 años para la localidad de Pergamino y para siembras de octubre obtuvieron un valor de 575 mm semejante a los encontrados por otros investigadores para zonas con características similares.

Por otra parte, la simultaneidad entre los procesos de transpiración y fijación de CO_2 permite considerar la producción de materia seca de un cultivo en función del agua transpirada y de la eficiencia con que la planta la aprovecha en términos de producción de biomasa o de producto cosechable. En Balcarce, Andrade y Gardiol (1994) observaron, bajo condiciones hídricas y nutricionales no limitantes, que el maíz evapotranspiró 530 mm de agua para producir 22.5 tn ha^{-1} de biomasa aérea. Por lo tanto la Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) fue de 42 kg ha^{-1} de materia seca por milímetro de agua consumida.

La floración es generalmente el período más crítico para la determinación del rendimiento de maíz. Alrededor de esta etapa fenológica se fija el número de granos por unidad de superficie, variable estrechamente relacionada con el rendimiento reproductivo.

Por ello el rendimiento en grano del maíz se torna altamente dependiente del contenido hídrico del suelo en un período que se extiende desde 15 días antes hasta 21 días después de la floración (Cárcova *et al.*, 2004^a).

Ante un estrés hídrico, la magnitud de las pérdidas de rendimiento depende de la oportunidad, intensidad y duración del mismo y se manifiestan a través de una disminución del número de espigas por planta y un menor número de granos por espiga (Andrade *et al.* 1996).

Con respecto al marco de plantación en maíz, la disponibilidad de recursos por planta (principalmente agua y nitrógeno) modifica marcadamente la respuesta a la densidad poblacional, por lo tanto en ambientes de buena disponibilidad hídrica y nutricional los mayores rendimientos se obtienen con densidades elevadas mientras que en ambientes pobres, la densidad óptima es sensiblemente menor (Cirilo, 2005).

El Índice de Area Foliar (IAF), superficie foliar fotosintéticamente activa de un cultivo expresada por unidad de superficie de suelo (m^2 hojas/ m^2 suelo), es un estimador muy apropiado junto con otros parámetros, para medir su crecimiento. Cuando los valores de IAF alcanzan niveles tales que permiten interceptar el 95 % de la radiación fotosintéticamente activa (IAF crítico) se logra la máxima tasa de crecimiento. El valor del IAF crítico varía entre los distintos cultivos y con las condiciones ambientales, pudiendo tomar como referencia un valor entre 4-5 para maíz (Andrade *et al.*, 1996).

La evolución del IAF durante la estación de crecimiento es afectada por un gran número de factores entre los que se destacan la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada y la temperatura, aunque también es modificado por el estado hídrico y nutricional del cultivo y otros factores de manejo como la fecha de siembra, distancia entre hileras y densidad (marco de plantación), etc (Slafer *et al.*, 2004).

El crecimiento de un cultivo depende de la radiación solar incidente, de la capacidad del canopeo para interceptarla y de la eficiencia con que el mismo transforma la radiación interceptada en materia seca. El rendimiento, por su parte, queda determinado por la manera con que el cultivo particiona la biomasa acumulada durante su crecimiento, entre los órganos de cosecha y el resto de la planta. En el maíz, la acumulación de biomasa y la proporción de la misma que es destinada a los órganos de cosecha son relativamente altas comparadas con las de otros cultivos que crecen en ambientes similares (Andrade *et al.*, 2000).

La alta capacidad del maíz para producir biomasa está condicionada por factores del ambiente y del cultivo. Entre los factores ambientales la radiación lumínica y la temperatura no son controlables en sistemas extensivos, lo que les otorga una importancia como determinantes del rendimiento máximo que se puede lograr en cada caso particular.

La tasa de crecimiento por lo tanto, está estrechamente relacionada con la

radiación diaria interceptada. De igual manera, la materia seca total producida desde la emergencia hasta la madurez fisiológica está directamente relacionada con la cantidad total de energía interceptada durante su ciclo. Esta cantidad de energía capturada para la fotosíntesis puede modificarse con prácticas de manejo como por ejemplo la densidad de siembra y/o alteraciones del arreglo de la disposición espacial de las plantas, lo cual permite interceptar diferentes cantidades de radiación cambiando la producción final de biomasa. Andrade *et al.* (1996) señalaron que al aumentar la densidad de 4.7 a 9.3 pl/m² en un híbrido de ciclo corto se logró un incremento de 132 MJ de radiación interceptada a lo largo de todo su ciclo.

En la última década, en distintas regiones productivas de la Argentina, el maíz ha experimentado cambios significativos en la densidad y el arreglo espacial de las plantas (surcos más estrechos y cultivos más densos). Este cambio requiere de un mayor grado de conocimiento sobre el impacto productivo de estas tecnologías, principalmente en áreas marginales a la producción por menor oferta hídrica como lo es el Sur de Córdoba (Satorre, 2005).

1.1. Antecedentes

En la actualidad los sistemas agrícolas se caracterizan por ser altamente dependientes de tecnologías de insumos para poder lograr resultados productivos y económicos que se adapten a las necesidades del productor. Sin embargo las herramientas de manejo adquieren igual importancia ayudando a optimizar las respuestas del cultivo a la oferta ambiental y al aporte de insumos como fertilizantes, riego, entre otros.

El marco de plantación, definido por la densidad de siembra y la distancia entre hileras, es sin lugar a dudas una de las herramientas de manejo más importante a tener en cuenta cuando el cultivo a implantar es el maíz, ya que se destaca por su incapacidad para ajustar su superficie foliar ante cambios en el número de plantas por superficie (Maddonni y Otegui 2006). Por esto, el maíz es el cultivo que presenta mayor respuesta en términos de cantidad de radiación interceptada y materia seca producida frente a aumentos en la densidad. El IAF varía considerablemente en respuesta a la densidad debido a que el área foliar por planta cambia muy poco ante modificaciones en el espacio disponible por planta (Cox, 1996).

La plasticidad reproductiva es aún menor que la vegetativa ya que en una densidad subóptima el número de granos de la primera espiga alcanza un *plateau* como resultado de limitaciones en el número potencial de granos por espiga. En los híbridos prolíficos que producen fijación de granos en una segunda espiga por tener un bajo umbral de tasa de crecimiento por planta para fijar una segunda espiga presentan mayor estabilidad del rendimiento ante reducciones en la densidad de plantas (Sarquis, 1998).

Por otro lado, a medida que la disponibilidad de recursos por planta disminuye, debido a incrementos en la densidad por encima de un óptimo, se producen abruptas reducciones en el número de granos por espiga a causa de la disminución en la tasa de crecimiento por planta. Esto puede ser el resultado de reducción en la distribución de asimilados hacia la espiga por la dominancia apical de la panoja. En consecuencia el maíz necesita mantener una alta tasa de crecimiento por planta para superar el umbral que permite lograr una favorable fijación de granos (Kruk y Satorre 2004).

El marco de plantación interacciona además con otros factores, uno de ellos, de vital importancia, es el consumo de agua por parte del cultivo tanto global (durante todo el ciclo) como por etapas, por lo que es importante estudiar cuales son las respuestas en cuanto al consumo de agua cuando realizamos variantes en el marco de plantación de manera de poder seleccionar aquellos que más convengan en distintas situaciones productivas, geográficas y de manejo. (Cirilo, 2005).

Una menor densidad de plantas en condiciones de baja disponibilidad hídrica

produce un uso conservativo del agua durante el período vegetativo al reducir la cobertura vegetal y dirigir una mayor proporción de radiación hacia la superficie seca del suelo, más resistente a la pérdida de agua que el cultivo, lo que puede incrementar la disponibilidad de agua en las etapas reproductivas. Sin embargo esto puede ser de utilidad solo en aquellos sistemas de producción que están sometidos a sequías progresivas y severas, y que dependen en gran medida del agua de reserva en el suelo (Andrade *et al.*, 1996).

Con respecto a la distancia entre hileras (el otro factor que define el marco de plantación), la mayor cobertura lograda por el follaje ante un menor espaciamiento disminuye la evaporación de agua del suelo, el escurrimiento superficial y la erosión. Sin embargo, esta práctica aumenta la proporción de radiación interceptada por las hojas y puede incrementar la transpiración del cultivo en la etapa vegetativa, lo cual puede tornar más severos los efectos de una sequía progresiva (Cirilo 2004); en consecuencia los déficit hídricos severos se adelantan y es más factible que se agote la humedad de reserva del suelo antes de los períodos críticos para la determinación del rendimiento (Vega y Andrade, 2000).

Resumiendo, en sistemas de alta producción de maíz (bajo riego y adecuada fertilización), los máximos rendimientos serán alcanzados con altas densidades que permitan lograr una buena cobertura y un alto número de granos fijados. En cambio, en ambientes pobres resulta conveniente utilizar densidades moderadas, pues las pérdidas de rendimiento por el uso de densidades supraóptimas en años secos son mayores que el potencial de rendimiento no explotado por el uso de densidades subóptimas en los años de buena disponibilidad hídrica. En este último caso, es conveniente utilizar híbridos prolíficos que en general presentan mayor capacidad de respuesta a buenas condiciones ambientales en densidades subóptimas (Andrade *et al.*, 1999).

En ausencia de limitaciones hídricas, especialmente durante el momento crítico de la floración, la respuesta del rendimiento a la reducción de la distancia entre surcos en maíz dependerá de la mejora en la cobertura que alcance el cultivo en esa etapa. Si el cultivo sembrado en surcos a 70 cm no logra plena captura de la luz incidente en floración, el rendimiento mejorará al acercar los surcos. La magnitud de la respuesta será mayor cuando mayor sea la intercepción de la luz en floración que se logra en el cultivo con surcos más angostos en comparación a siembras en surcos mas espaciados (Andrade *et al.*, 2002).

Farnham (2001) señaló que las respuestas en rendimiento al acortamiento de la distancia entre surcos del maíz han sido variadas e inconsistentes, en un estudio llevado a cabo en diversas localidades del cinturón maicero estadounidense. El mismo autor también encontró que la densidad óptima de siembra fue independiente de la distancia entre surcos. Contrariamente, Widdicombe y Thelen (2002) en 11 localidades del cinturón maicero, hallaron respuestas significativas al estrechar surcos de 76 a 56 y 38 cm del 2 y 4 % respectivamente.

En Balcarce, Argentina, Barbieri *et al.* (2000) encontraron un 14,5 % y 20,5% de aumento en el número de granos y en el rendimiento en grano, respectivamente, cuando compararon surcos a 35 cm y 70 cm. Sin embargo estas diferencias aumentaron cuando la disponibilidad de N fue inferior a la necesaria.

Por el contrario, algunos autores indicaron que la siembra en surcos angostos presenta ventajas como, una menor pérdida de agua por evaporación (Karlen y Camp, 1985), inhibir el crecimiento de malezas (Chikoye *et al.* 2005) y mejorar la absorción de nutrientes del suelo (Barbieri *et al.* 2000).

Recientemente, Sharratt y Mc Williams (2005) encontraron que la siembra a surcos más estrechos permitió un mejor aprovechamiento del agua del suelo por una mayor uniformidad de exploración radical y por una disminución de la evaporación directa por sombreo.

Lambert y Lowenberg-DeBoer (2003) determinaron que la conveniencia económica de sembrar con surcos más estrechos en maíz depende de las características ambientales de producción.

1.2. Hipótesis

Un estrechamiento de la distancia entre hileras y aumento de la densidad de plantas generaría un mayor consumo de agua del cultivo de maíz en estadios tempranos de crecimiento que afectaría la disponibilidad hídrica alrededor de la floración (período crítico) disminuyendo el rendimiento.

1.3. Objetivos

General

Evaluar el efecto de la distancia entre hileras y la densidad de plantas sobre la disponibilidad hídrica del cultivo de maíz y su relación con el rendimiento.

Específicos

- Evaluar el efecto de la distancia entre hileras y la densidad de siembra sobre el consumo de agua en el cultivo de maíz.
- Evaluar el efecto de la distancia entre hileras y la densidad de siembra sobre la evolución del índice de área foliar (IAF) y el rendimiento del cultivo.

2. Materiales y Métodos

2.1. Descripción general del ensayo experimental

El ensayo se llevó a cabo en el campo experimental de la U.N.R.C., durante la campaña agrícola 2001/2002.

La preparación de la cama de siembra se realizó mediante labranza convencional controlando las malezas en este período con la aplicación de un herbicida de presiembrado incorporado de acción residual.

El diseño experimental utilizado fue en bloques completamente aleatorizados con un arreglo espacial en parcelas divididas, con tres repeticiones por tratamiento, en donde el factor principal fue la distancia entre hileras y el factor secundario la densidad de siembra. Las distancias entre hileras evaluadas (DEH) fueron de 0.70 y 0.52 metros, mientras que las tres densidades de siembra (DEN) fueron de 45000, 65000 y 85000 plantas por hectárea.

La siembra se efectuó a mano el 2/11/2001. La semilla utilizada fue el híbrido simple Dekalb 682 colocando una semilla por golpe, realizando además la reposición de plantas no emergidas mediante trasplante con posterioridad a la emergencia.

Se realizó fertilización de todas las parcelas cuando el cultivo se encontraba en V_8/V_9 , utilizando para tal fin 50 kg ha⁻¹ de urea (NPK 46-0-0), dosis calculada por el modelo de simulación NP-Zea (Gesumaría *et al.*, 2000) de acuerdo a las condiciones de suelo y climáticas reinantes en ese período.

El tamaño de cada parcela fue de 5 surcos por 5 m de largo. Las determinaciones realizadas durante el ensayo se llevaron a cabo en los tres surcos centrales. El cultivo se mantuvo libre de malezas en todos sus estadíos mediante limpieza manual, con respecto a los insectos no hubo prácticamente problemas mas allá de la presencia de trips alrededor del estadío fenológico V_6 sin ser necesario su control. Además, no existieron manifestaciones de enfermedades durante el ciclo del cultivo.

La cosecha se realizó el 10/04/2002, a mano, evaluando en cada parcela 3 metros lineales de los tres surcos de la parte central donde las plantas se encontraban en competencia perfecta.

2.2. Descripción de las determinaciones realizadas

2.2.1. Evolución de la humedad edáfica: se determinó el contenido hídrico del suelo hasta una profundidad de 1,2 m en los estadíos fenológicos de siembra, V_8 , V_{12} , R_1 , R_4 y madurez fisiológica (Ritchie y Hamway, 1997) mediante la utilización de TDR (Time Domain Reflectometry, Trase System Soil Moisture Equipment Corp. Santa Bárbara. CA. USA.), el cual determina la humedad volumétrica de suelo por medio de sensores. Los mismos permiten medir el contenido hídrico de un estrato de 0,20 m de perfil vertical de suelo. En cada parcela fueron instalados 4 sensores a las siguientes profundidades:

0,00 m – 0,20 m

0,20 m – 0,40 m

0,60 m – 0,80 m

1,00 m – 1,20 m

En las profundidades 0,40 m – 0,60 m y 0,80 m – 1,00 m, sin sensores, los valores de humedad fueron estimados mediante el método de interpolación lineal entre los valores del estrato superior e inferior a cada capa respectivamente. Todos los sensores fueron instalados mediante la perforación con barreno de mecha, de 8 cm de diámetro.

Posteriormente los datos de humedad volumétrica fueron transformados a lámina de agua a través de una regla de tres simple entre la medición estimada por el TDR y la profundidad de perfil evaluada (20 cm.), con lo que se calculó la lámina almacenada por el suelo cada 20 cm y total hasta 1,2 m de profundidad.

2.2.2. Índice de área foliar: La evolución de dicho índice fue medida en los estadíos de V_8 , V_{12} , R_1 , R_4 y madurez fisiológica utilizando el LAI - 2000 Plant Canopy Analyser LI-COR. Lincoln. NE. USA. Realizándose tres repeticiones por parcela en cada medición.

2.2.3. Determinación de la biomasa aérea total producida por el cultivo: la misma fue evaluada en madurez fisiológica del cultivo, sobre un total de tres plantas por parcela, que se encontraban en condiciones de competencia perfecta, las cuales fueron cortadas y llevadas a estufa de circulación de aire forzado a una temperatura de alrededor de 105 °C hasta llegar a peso constante y posteriormente pesadas en balanza de precisión. Luego se estimó la biomasa total por hectárea a partir de la densidad de plantas de cada parcela.

2.2.4. Cálculo del consumo de agua: el mismo fue realizado por etapas y en forma global (entre siembra y madurez fisiológica) mediante el método del balance hídrico simplificado planteado por Marcos (2000), donde:

ETR (mm) = Precipitaciones (mm) – Esguerrimiento (mm) – Drenaje (mm) +/- ΔHumedad

- Precipitaciones: las mismas fueron registradas diariamente en la estación meteorológica automática de la Universidad Nacional de Río Cuarto, ubicada a pocos metros del lugar del ensayo en el mismo campo experimental.
- Esguerrimiento: el esguerrimiento fue estimado mediante el método de la curva número del U.S. Soil Conservation Service que calcula el esguerrimiento en milímetros de una lluvia en 24 hs a partir de un umbral crítico de esguerrimiento (P_0) definido por el tipo de suelo, condiciones de superficie, pendiente y humedad retenida en el suelo en el momento de iniciarse la precipitación. El valor de P_0 utilizado para este estudio fue de 25 mm de acuerdo a las estimaciones de la Cátedra de Uso y Manejo de Suelos de la FAV-UNRC según las características hidrológicas del sitio (el propio campo experimental de la Facultad de Agronomía y Veterinaria).

La ecuación matemática es la siguiente:

$$\Sigma E = \frac{(\Sigma P - P_0)^2}{\Sigma P + 4P_0}$$

Donde:

ΣE : esguerrimiento (mm)

P_0 : umbral de esguerrimiento (25 mm, en el campo experimental de la UNRC).

ΣP : precipitación en 24 horas (mm). Datos de la estación meteorológica de la UNRC

ΣE : 0 si $\Sigma P \leq P_0$ y $\Sigma E \neq 0$ si $\Sigma P > P_0$

- Drenaje: para verificar la existencia de drenaje de agua hacia capas profundas se instalaron en seis parcelas, dos en cada bloque, sensores TDR a 2 m de profundidad mediante la utilización de un barreno de mecha con prolongaciones. De ésta manera se estimó la magnitud de dicho fenómeno, en caso de presentarse, en base al aumento o disminución de la humedad edáfica a esas profundidades (Marcos, 2001).

- ΔHumedad: el cálculo de las diferencias en el contenido de humedad entre mediciones consecutivas se realizó a partir de los datos arrojados por el TDR luego de haberlos transformados como antes se mencionara en lámina de agua.

Finalmente, una vez obtenido el resultado del balance hídrico por etapas y global se fraccionó la evapotranspiración en transpiración, que representa el consumo de agua del

cultivo y evaporación directa desde el suelo, a partir del uso de la fracción de intercepción (Marcos, 2000).

La fracción de intercepción, se relacionó con el IAF a través de una función de tipo exponencial (Cárcova *et al.*, 2004^b) presentada en la siguiente ecuación:

$$FI = 1 - \exp^{-K \cdot IAF}$$

Donde:

FI: fracción de intercepción

K: coeficiente de extinción de la radiación (se utilizó 0,45 para el maíz)

IAF: índice de área foliar

Entonces el cálculo de la transpiración se efectuó de la siguiente manera:

Transpiración (Consumo de agua) = ETR * FI (Marcos, 2000)

Donde: ETR: evapotranspiración real (mm)

FI: fracción de intercepción.

2.2.5. Cálculo de las eficiencias en el uso del agua (EUA): finalmente se realizaron los cálculos de las EUA entre la biomasa total y la producción de granos con la evapotranspiración real (ETR). Los datos son expresados en términos de kg ha⁻¹ de materia seca y de grano por mm de agua evapotranspirada.

2.2.6. Determinación del rendimiento: Las espigas fueron trilladas con una desgranadora fija y luego fue registrado el peso de los granos extraídos. Posteriormente se extrajo una alícuota de cada parcela con el objetivo de realizar mediciones de humedad para posteriormente corregir el peso de los granos, calculando el rendimiento con un contenido de 14.50 % de humedad (condición de entrega) de acuerdo a la tabla de merma. El rendimiento por hectárea se calculó a partir de los datos de la superficie cosechada por parcela y el rendimiento en esa superficie. Finalmente para determinar el peso de 1000 granos se separaron en forma aleatoria dos muestras de 100 granos de cada parcela, cada una las cuales fue pesada y corregido su peso por humedad de igual forma que para la estimación del rendimiento, ese dato fue usado para estimar, mediante una regla de tres simple, el peso de 1000.

2.3. Análisis de la información experimental

Toda la información obtenida fue analizada con ANAVA con el programa INFOSAT (Versión 2007p) y comparación de medias según prueba DMS de Fisher (P≤0.05).

3. Resultados y Discusión

3.1. Fenología, precipitaciones

Como puede apreciarse en la Tabla 1, el cultivo cumplió su ciclo de crecimiento en 135 días, entre el 2/11/01 y el 17/03/02, por lo que se lo puede clasificar como un cultivar semiprecoz, tal cual lo manifiesta la empresa Monsanto, sin haberse identificado diferencias fenológicas entre tratamientos.

Tabla 1: Fenología y precipitaciones durante el ciclo del cultivo

Estado fenológico	Fecha	Duración del período	Días acumulados	Precipitaciones entre etapas	Precipitación acumulada
		(días)	(días)	(mm)	(mm)
Siembra	02-11-01	-	-	-	-
V ₂	15-11-01	13	13	24	24
V ₄	23-11-01	8	21	0	24
V ₈	04-12-01	11	32	0	24
V ₁₂	21-12-01	17	49	15	39
R ₁	10-01-02	20	69	102	141
R ₃	30-01-02	20	89	30	171
R ₄	14-02-02	15	104	4	175
R ₆	17-03-02	31	135	73	248

V₂, V₄, V₈, V₁₂, R₁, R₃, R₄ y R₆; estadios fenológicos del maíz según escala propuesta por Ritchie y Hanway (1997).

En lo referente a las precipitaciones, como se observa en la Figura 1, la campaña 2001/02 presentó entre septiembre y marzo un total 543 mm, siendo el registro promedio (1974/2006) para el mismo periodo de 670 mm. Esta diferencia indicaría que las precipitaciones de la campaña bajo análisis fueron un 23,4 % inferior a los registros promedios. No obstante, en septiembre y octubre del 2001, las precipitaciones fueron de 260 mm, siendo el valor promedio para esos meses de 104 mm, es decir un 150 % superior al promedio. Por otro lado, entre noviembre y marzo los valores de la campaña 2001/02 fueron de 300 mm contra los 566 mm del promedio, es decir un 88% inferior a este último.

Esta situación determinó que el cultivo iniciara su crecimiento con un perfil de suelo bien cargado de humedad, la cual fue disminuyendo a medida que avanzó el ciclo hasta alrededor del período crítico del cultivo en donde las precipitaciones ocurridas en ésta etapa produjeron una leve recuperación de los niveles hídricos del suelo. Posteriormente, durante la etapa de llenado de granos, el contenido hídrico del suelo nuevamente fue disminuyendo hasta finalizar el ciclo del cultivo (ver Figura 2).

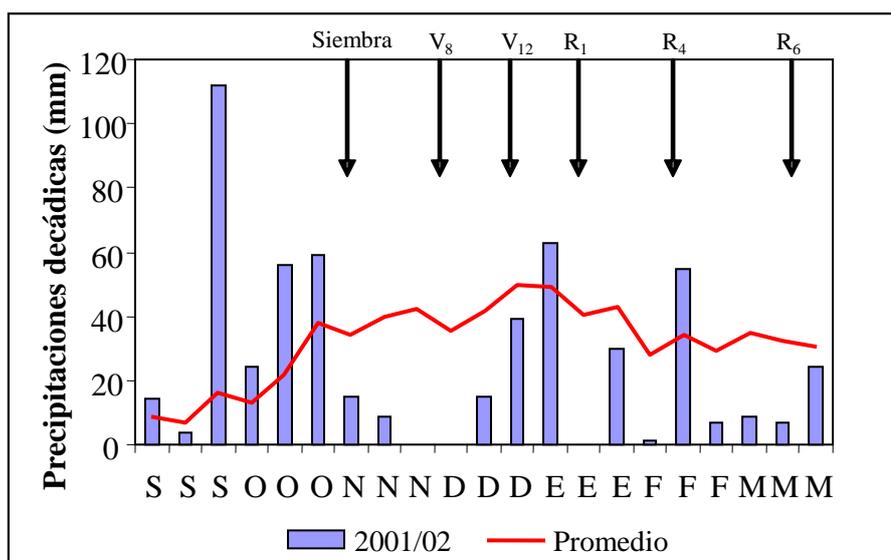


Figura 1: Precipitaciones decádicas y medias normales en Río Cuarto durante la campaña 2001/2002 y promedio (1974/06).
 V_8 , V_{12} , R_1 , R_4 y R_6 ; estadios fenológicos del maíz según escala propuesta por Ritchie y Hanway (1997).

3.2. Evolución del contenido hídrico total hasta 120 cm de profundidad

Durante el desarrollo del cultivo la lámina total de agua en los primeros 120 cm, presentó diferencias significativas solamente en V_{12} y R_4 a nivel de las diferentes densidades de siembra. En relación al efecto de la distancia entre hileras y a la interacción $DEH \cdot DEN$ los resultados no fueron significativos estadísticamente.

Tabla 2: Lámina total de agua en los primeros 120 cm del suelo (mm)

Tratamiento	Lámina de agua total en 120 cm (mm)						
	Siembra	V_5	V_8	V_{12}	R_1	R_4	R_6
DEH 70 cm	276 a	249 a	234 a	174 a	203 a	142 a	125 a
DEH 52 cm	277 a	250 a	237 a	182 a	213 a	151 a	126 a
DMS	14.8	18.7	28.4	22.1	30.5	17.6	6.9
DEN 45000 pl ha ⁻¹	277 a	248 a	237 a	191 a	218 a	155 a	126 a
DEN 65000 pl ha ⁻¹	276 a	252 a	239 a	176 ab	205 a	148 ab	127 a
DEN 85000 pl ha ⁻¹	275 a	248 a	231 a	166 b	201 a	137 b	123 a
DMS	17.7	14.7	16.5	15.9	23.4	14.5	12.0
P (DEN*DEH)	0.28	0.28	0.40	0.06	0.19	0.80	0.33
CV (%)	4.81	4.43	5.26	6.72	8.46	7.45	5.10

En columnas, valores en negrita y letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$), según prueba DMS de Fisher. DMS, diferencia mínima significativa. DEH, distancia entre hileras. DEN, densidad de siembra. V_5 , V_8 , V_{12} , R_1 , R_4 y R_6 ; estadios fenológicos del maíz según escala propuesta por Ritchie y Hanway (1997). P (DEN*DEH) valor p de la interacción densidad de siembra por distancia entre hileras. CV (%), es el coeficiente de variación en %.

En un modo análogo a lo observado en la Tabla 2, en la Figura 2 se puede observar la evolución temporal del contenido hídrico total del suelo hasta los 120 cm de profundidad. En la misma se aprecia que esta variable estuvo relacionada con la distribución de precipitaciones durante el ciclo del cultivo. En este sentido entre siembra y V_{12} se aprecia una disminución continua de la humedad del suelo consecuentemente con la ausencia de precipitaciones en este periodo (Figura 1), por este motivo el contenido en V_{12} fue menor a medida que aumentaba la densidad de siembra como consecuencia del mayor consumo. Entre V_{12} y R_1 se evidencia un marcado ascenso de la humedad producto de las precipitaciones ocurridas en esta etapa, para luego continuar la disminución hasta R_6 . Similarmente a lo planteado en V_{12} , en R_4 debido a las escasas precipitaciones la humedad del suelo fue afectada por la densidad. Cabe aclarar que el contenido de agua a 15 bares de succión o PMP (punto de marchites permanente) en este suelo es de aproximadamente 120 mm en los primeros 120 cm de profundidad (Rivetti, 2004), por lo tanto a partir de R_4 los valores de humedad evaluados se encontraron muy cercanos a este punto razón por la cual no se evidenciaron efectos de los tratamientos en R_6 .

El máximo registro de lámina total hasta los 120 cm de profundidad, durante el ciclo del cultivo, fue de alrededor de 276 mm (promedio de todos los tratamientos) en el momento de la siembra, mientras que el mínimo 125 mm en R_4 (grano pastoso).

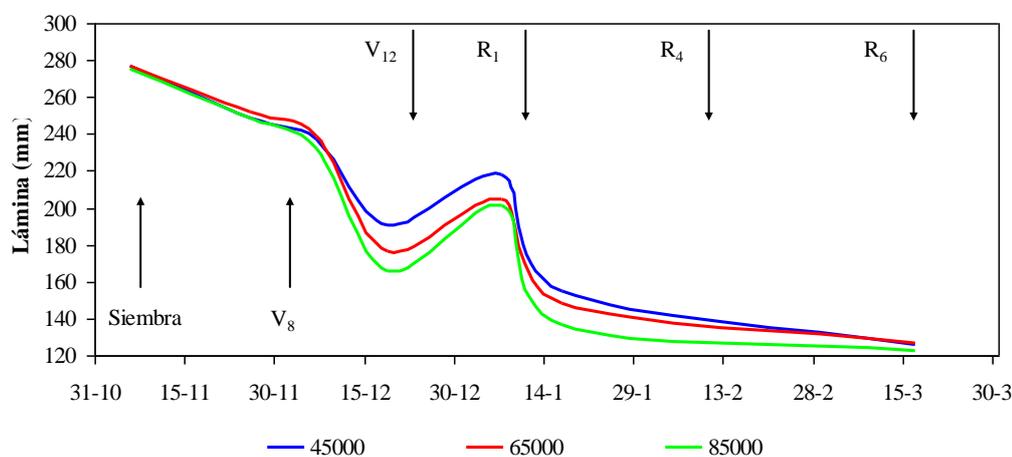


Figura 2: Evolución del contenido hídrico del suelo (mm) hasta los 120 cm de profundidad.

Ref.: Series, densidad (plantas ha⁻¹). V_8 , V_{12} , R_1 , R_4 y R_6 ; estadios fenológicos de maíz según Ritchie y Hanway (1997).

3.3. Consumo de agua y Evapotranspiración real del cultivo

En la Tabla 3 se observa el consumo de agua por etapas, total y la evapotranspiración real. En la misma se puede apreciar que la interacción densidad por distancia entre hileras no fue significativa en ninguno de los momentos analizados.

En relación a la distancia entre hileras se encontró que los surcos más estrechos no han incrementado la demanda de agua del cultivo (medida como consumo) en ninguna de las etapas analizadas ni entre siembra y R₆, como así tampoco en la evapotranspiración real del cultivo en todo su ciclo (Tabla 3).

Estos resultados contradicen a lo planteado por Cirilo (2005) puesto que como se mencionó anteriormente entre siembra y V₁₂ las escasas precipitaciones (Figura 1) y la humedad del suelo (Tabla 2 y Figura 2) explican una sequía progresiva que no se tradujo en un mayor consumo de agua en los surcos a 52 cm que a 70 cm.

Tabla 3: Consumo de agua por etapas y evapotranspiración total del maíz en distintas densidades de siembra y distancias entre hileras.

Tratamiento	Consumo de agua (mm)						ETR (mm)
	S-V ₈	V ₈ -V ₁₂	V ₁₂ -R ₁	R ₁ -R ₄	R ₄ -R ₆	S-R ₆	
DEH 70 cm	18.26 a	44.74 a	88.36 a	34.19 a	45.34 a	230.86 a	411.05 a
DEH 52 cm	18.78 a	42.86 a	92.53 a	37.37 a	45.48 a	237.00 a	408.77 a
DMS	11.99	3.56	23.64	6.45	4.98	14.10	10.55
DEN 45000 pl ha ⁻¹	14.29 b	33.17 b	92.42 a	36.86 a	38.22 b	214.91 b	408.32 a
DEN 65000 pl ha ⁻¹	18.58 ab	46.39 a	90.17 a	35.12 a	47.96 a	238.18 a	408.47 a
DEN 85000 pl ha ⁻¹	22.69 a	51.85 a	88.76 a	35.35 a	50.06 a	248.72 a	412.95 a
DMS	4.96	8.44	7.49	5.31	9.60	12.96	10.51
P (DEN*DEH)	0.7843	0.3371	0.1120	0.7593	0.9952	0.3131	0.0985
CV (%)	20.11	14.47	6.22	11.14	15.88	4.16	1.93

En columnas, valores en negrita y letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$), según prueba DMS de Fisher. DMS, diferencia mínima significativa. DEH, distancia entre hileras. DEN, densidad de siembra. ETR, evapotranspiración real entre siembra y R₆. S, siembra. V₈, V₁₂, R₁, R₄ y R₆; estadios fenológicos del maíz según escala propuesta por Ritchie y Hanway (1997). P (DEN*DEH) valor p de la interacción densidad de siembra por distancia entre hileras. CV (%), es el coeficiente de variación en %.

En lo referente al otro componente del marco de plantación, la densidad de plantas (Tabla 3), el comportamiento fue diferente ya que hubo respuesta significativa tanto en los estadios tempranos de desarrollo (S-V₈, V₈-V₁₂) como en las etapas finales del ciclo del cultivo (R₄-R₆) y para el cálculo de todo el ciclo (S-R₆). A excepción de el primer periodo, el consumo de agua fue estadísticamente significativo entre la densidad de 45000 plantas ha⁻¹ con respecto a los otros dos tratamientos, 65000 y 85000 plantas ha⁻¹, no existiendo diferencias entre éstos. Durante el primer periodo de observación, las diferencias halladas en

consumo sólo fueron significativas entre las 45000 y 85000 plantas ha^{-1} .

Estos resultados pueden ser explicados porque en las primeras etapas del maíz (S-V₈) las plantas son pequeñas y con bajo consumo de agua por planta, debido a ello se interpreta que las diferencias con el tratamiento intermedio no hayan sido significativas. En los restantes momentos analizados es fácil comprender que ante la escasa ocurrencia de lluvias el cultivo consumió principalmente la reserva de humedad del suelo y por este motivo una mayor población justificó un mayor consumo de agua.

Ésta respuesta no observada en las etapas críticas de definición del rendimiento V₁₂-R₁ y R₁-R₄, puede ser explicada debido a la recomposición de la humedad del suelo por parte de las precipitaciones ocurridas entre V₁₂-R₁ (Figura 1), las cuáles repusieron la disponibilidad hídrica (Tabla 2 y Figura 2).

En relación a la evolución del consumo diario de agua durante el ciclo del cultivo (Figura 3), podemos observar que entre siembra y V₈ se registró el menor consumo de agua (0.58 mm día⁻¹), mientras que el mayor consumo diario fue en el periodo V₁₂-R₁ (4.52 mm día⁻¹) Estas diferencias pueden ser explicadas posiblemente a que en los niveles iniciales la escasa interceptación de la radiación por parte del cultivo implica una menor transpiración y una mayor evaporación. En la etapa de elongación de entrenudos, momento en que el cultivo manifiesta un aumento en la tasa de crecimiento bastante marcado, el consumo de agua aumentó a 2.58 mm día⁻¹ (V₈-V₁₂). Posteriormente en la etapa R₁-R₄ durante la fijación y el llenado de granos el consumo disminuyó drásticamente debido a la disminución de la disponibilidad hídrica (Figura 2).

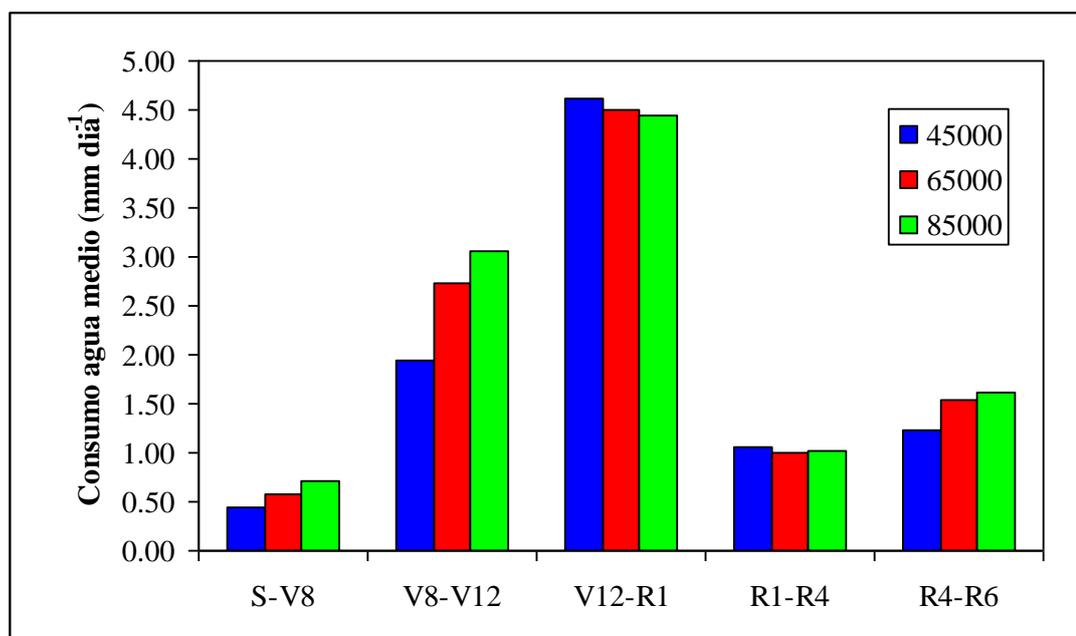


Figura 3: Consumo medio diario de agua en diferentes etapas del maíz. 45000, 65000 y 85000 plantas ha^{-1} . S, siembra. V₈, V₁₂, R₁, R₄ y R₆; estadios fenológicos del maíz según escala propuesta por Ritchie y Hanway (1997)

El consumo total de agua del cultivo (S-R₆) no tuvo respuesta a la distancia entre hileras, a pesar de que los tratamientos espaciados a 52 cm entre hileras consumieron alrededor de 7 mm más de agua que los espaciados a 70 cm (237 vs 230.86 mm, respectivamente). En cambio, se observó diferencias significativas entre densidades de plantas (Tabla 3). En promedio las plantas consumieron hasta madurez fisiológica 214.91 mm de agua cuando la densidad fue de 45000 plantas ha⁻¹, mientras que el consumo ascendió significativamente un 10.8 % y un 15.7 % en los tratamientos de 65000 y 85000 pl ha⁻¹, respectivamente, siendo estadísticamente nula la diferencia entre estos últimos. Estas diferencias en el consumo de agua se manifestaron principalmente desde siembra hasta V₁₂ y posteriormente desde R₄ a R₆.

Evidentemente, el componente del marco de plantación de mayor influencia sobre el consumo de agua fue la densidad de plantas, ya que solo se observaron respuestas significativas en torno a este factor. El aumento en el número de individuos por hectárea generó un mayor consumo en las etapas iniciales y al final del ciclo del cultivo, hecho que no se observó alrededor del período crítico.

En cuanto a la evapotranspiración real total del cultivo (ETR), los resultados no fueron significativos para el marco de plantación, siendo de alrededor de 410 mm (promedio de todos los tratamientos) la cantidad de agua evapotranspirada por el cultivo entre siembra y madurez fisiológica. Los valores obtenidos son algo inferiores a los observados por Totis de Zeljkovich y Rebella (1980) en Pergamino, aunque no debemos olvidarnos que dicha localidad se encuentra en la pampa húmeda a diferencia de Río Cuarto que se encuentra en una región subhúmeda, y que además el registro pluviométrico durante el ciclo en que se llevó a cabo el ensayo estuvo por debajo de la media histórica para la localidad (23,4 % inferior para la campaña 2001/02 en relación al promedio histórico).

3.4. Índice de Área Foliar (IAF)

En la Tabla 4 se presentan los resultados del IAF durante el ciclo del cultivo. En la misma se aprecia que la interacción distancia entre hileras por densidad no fue significativa en ninguna de las etapas analizadas.

La primera medición de IAF se realizó el 07/12/01, cuando el cultivo se encontraba en V₈. En este estadio la distancia entre hileras no generó diferencias significativas en los valores de IAF. En cuanto a las densidades se observaron diferencias significativas entre los tres tratamientos (Tabla 4), encontrándose valores cada vez mayores de IAF a medida que la densidad también iba aumentando desde 45000 a 85000 plantas ha⁻¹. En este sentido, el aumento en la densidad de plantas (de 45000 a 65000) incrementó el IAF

en un 40.35 %, mientras que cuando la densidad se elevó a 85000 el aumento sobre 45000 fue del 63.15%. Entre 65000 y 85000 plantas ha⁻¹ la diferencia de IAF evaluada fue del 16.25%.

Tabla 4: Evolución del IAF del maíz en diferentes etapas del ciclo del cultivo (m² hojas/m² suelo) según distintas distancias entre hileras y densidad de plantas.

Tratamiento	V ₈	V ₁₂	R ₁	R ₄
DEH 70 cm	0.74 a	2.02 a	2.76 b	2.25 a
DEH 52 cm	0.80 a	2.10 a	3.05 a	2.31 a
DMS	0.26	0.23	0.29	0.26
DEN 45000 pl ha ⁻¹	0.57 c	1.78 c	2.67 a	1.96 b
DEN 65000 pl ha ⁻¹	0.80 b	2.09 b	2.99 a	2.38 ab
DEN 85000 pl ha ⁻¹	0.93 a	2.33 a	3.06 a	2.51 a
DMS	0.12	0.24	0.44	0.46
P (DEN*DEH)	0.73	0.55	0.93	0.93
CV (%)	12.18	8.69	11.31	15.36

En columnas, valores en negrita y letras distintas indican diferencias significativas con una probabilidad del 5% según prueba DMS de Fisher. DMS, diferencia mínima significativa. DEH, distancia entre hileras. DEN, densidad de siembra. V₈, V₁₂, R₁ y R₄; estadios fenológicos del maíz según escala propuesta por Ritchie y Hanway (1997). P (DEN*DEH) valor p de la interacción densidad de siembra por distancia entre hileras. CV (%), es el coeficiente de variación en %.

Es importante considerar que el aumento de densidad y/o un arreglo de disposición espacial más uniforme de las plantas en el cultivo como es el estrechamiento de hileras permite una cobertura más temprana y pareja, lo cual reduce el tiempo necesario para alcanzar el IAF crítico y posibilita que el mismo se logre con menor superficie foliar, lo que genera una mayor producción final de biomasa con el impacto que esto puede llegar a tener si se dan condiciones favorables en la producción final en granos del cultivo (Andrade *et al.* 1996).

La situación en V₁₂ (21/12/01) fue similar a V₈, encontrándose diferencias significativas solo en respuesta a la densidad de plantas, aumentando los valores de IAF a medida que también lo hacía la densidad. Hasta este momento el componente densidad del marco de plantación se manifiesta con mayor efecto sobre el IAF que la distancia entre hileras. Las diferencias de IAF encontradas entre densidades fueron del 17.42% y del 30.90% a favor de las densidades de 65000 y 85000 plantas ha⁻¹ sobre las 45000 plantas ha⁻¹, respectivamente. Entre las dos mayores densidades la diferencia fue del 11.48%.

Siguiendo con la fenología del cultivo, en R₁ (10/01/02) la situación es completamente diferente, ya que las diferencias existentes de IAF debidas a la densidad de plantas no llegan a ser significativas, pero se manifiesta una respuesta a la distancia entre hileras, siendo el índice de área foliar de los tratamientos a 52 cm entre hileras

significativamente superiores a los de 70 cm (Tabla 4). Además, en este estadio se registraron los valores máximos de IAF en todos los tratamientos, ya que en este momento el cultivo presentaba la totalidad de sus hojas completamente expandidas. El mayor valor medido (3.17) correspondió al tratamiento con mayor densidad y menor espaciamiento entre hileras, mientras que el menor valor (2.48) se registró en la menor densidad y el mayor espaciamiento entre hileras. La diferencia de IAF encontrada entre 52 y 70 cm fue sólo del 10.51 %, lo cual permite suponer que aunque la misma fue estadísticamente significativa su efecto sobre la tasa de crecimiento del maíz fue de baja magnitud (ver producción de biomasa punto 3.4).

De acuerdo a lo planteado por Sharratt y McWilliams (2005) es factible esperar que una mayor uniformidad en la distribución de las hojas en surcos estrechos sea la causa del mayor IAF encontrado principalmente entre inicio de alargamiento de entrenudos (V_8) y floración (R_1). También es importante destacar que los valores registrados están levemente por debajo del IAF crítico si se toma como referencia los citados por Andrade *et al.* (1996) para el sudeste bonaerense, quienes afirman que para interceptar el 95 % de la radiación fotosintéticamente activa es necesario lograr valores de IAF entre 4-5. El hecho de no haber alcanzado los niveles de IAF crítico, puede deberse a que desde el momento de la siembra hasta aproximadamente el comienzo del período crítico el perfil de suelo se fue secando debido a los bajos niveles de precipitaciones ocurridos y al consumo de agua del cultivo, por lo que la expansión y el crecimiento foliar, factores que se definen en este período, pueden haberse visto comprometidos.

La última medición de IAF se realizó en R_4 el 14/02/02, donde se encontraron en este momento valores menores a los registrados en R_1 , debido fundamentalmente a la senescencia de hojas causada por la removilización de reservas hacia la espiga, que es en este período el principal destino de las sustancias de reserva de la planta. En este caso la situación se revierte nuevamente, encontrándose diferencias significativas en respuesta a los aumentos de la densidad, pero sin diferencias a causa de la distancia entre hileras. En éste estadio el mayor valor de IAF (2.51) fue registrado en los tratamientos de 85000 plantas ha^{-1} y fue significativamente superior al de 45000 plantas ha^{-1} , siendo el IAF del tratamiento 65000 una situación intermedia entre ambos. La diferencia de IAF entre la densidad más baja y la más alta fue del 28.06%.

3.5. Producción de materia seca total

La biomasa total producida cuando el cultivo se encontraba en madurez fisiológica, no manifestó diferencias significativas en respuesta a los diferentes marcos de plantación evaluados (Tabla 5), siendo prácticamente nula la respuesta a los dos

componentes del mismo (distancia entre hileras y densidad) como la interacción entre ambos.

Tabla 5: Materia seca total del maíz en madurez fisiológica según distintas distancias entre hileras y densidad de plantas.

Tratamiento	Materia seca en madurez fisiológica (kg ha ⁻¹)
DEH 70 cm	22388.1 a
DEH 52 cm	21048.8 a
DMS	3514.8
DEN 45000 pl ha ⁻¹	19655 a
DEN 65000 pl ha ⁻¹	22900 a
DEN 85000 pl ha ⁻¹	22600 a
DMS	3478.9
P (DEN*DEH)	0.76
CV (%)	12.03

En columnas, valores en negrita y letras distintas indican diferencias significativas con una probabilidad del 5% según prueba DMS de Fisher. DMS, diferencia mínima significativa. DEH, distancia entre hileras. DEN, densidad de siembra. P (DEN*DEH) valor p de la interacción densidad de siembra por distancia entre hileras. CV (%), es el coeficiente de variación en %.

De acuerdo a lo observado, el marco de plantación no generó diferencias significativas en la producción de biomasa de los distintos tratamientos. Al parecer, las características del híbrido y las condiciones ambientales permitieron que los tratamientos con menores densidades lograran manifestar un cierto grado de plasticidad vegetativa, compensando con un mayor crecimiento individual la falta de plantas y por lo tanto que los niveles de biomasa producidos por estos fueran similares a los producidos por los otros tratamientos. De hecho se observaron a campo marcadas diferencias en cuanto al tamaño de las plantas, tamaño de espigas y número de espigas por planta en respuesta a las variaciones de densidad a favor de las menores poblaciones por hectárea. Por estas características se puede inferir que el híbrido empleado presenta elevada plasticidad.

Finalmente se destaca que los datos de producción de biomasa se encuentran dentro del promedio para la zona (Rivetti, 2005) y son algo inferiores a los registrados por Andrade *et al.* (1996) en el sudeste bonaerense en donde con densidades de 85000 pl/ha y maíces de ciclo intermedio lograron producciones de biomasa de entre 25 y 30 tn ha⁻¹.

Desde el punto de vista de la cantidad de precipitaciones ocurridas durante el ciclo, los valores de producción de biomasa fueron muy buenos, ya que se lograron entre 19 y 24 Tn de materia seca por hectárea con solo 248 mm de precipitaciones durante el ciclo, lo que implica menor IAF, menor intercepción de la radiación y menor intercambio neto de carbono con el ambiente.

La falta de diferencias en la producción de materia seca total a pesar de haber encontrado diferencias en el consumo total de agua, puede deberse a que en el tratamiento de 85000 plantas ha⁻¹ el consumo de agua fue sólo 33.81 mm mayor que el de 45000 plantas ha⁻¹ y ello no alcanzó a marcar diferencias en la producción de biomasa.

Tabla 6: Regresión lineal entre Consumo por etapas e IAF.

Etapa	Ecuación de ajuste	R ²
Siembra – V ₈	$y = 22.48x + 1.28$	95.78%
V ₈ -V ₁₂	$y = 29.62x - 17.22$	69.88%
V ₁₂ -R ₁	$y = -1.63x + 95.18$	0.39%
R ₁ -R ₄	$y = -1.76x + 39.78$	4.93%

Como se observa en la Tabla 6, el IAF en V₈ explica linealmente el consumo de agua en las etapas de siembra a V₈ y el IAF en V₁₂ también guarda una relación lineal con el consumo de agua entre V₈ y V₁₂. Por el contrario, entre V₁₂ y R₄ las relaciones entre el IAF y el consumo de agua no fueron lineales. Si bien ha sido ampliamente demostrado que el consumo de agua del maíz mantiene una relación lineal con el área foliar del mismo, dado que ésta es la superficie transpirante (Dardanelli *et al.* 2004), el cambio de IAF producido por el marco de plantación en este ensayo mantuvo esta relación en la medida que el IAF fue fuertemente afectado por la densidad (Tabla 4, diferencias entre las tres densidades desde siembra hasta V₁₂), en las etapas donde el marco de plantación afectó en baja proporción al IAF (diferencias entre el 10 al 28%, desde R₁ a R₄) el consumo de agua no presentó relación lineal con esta variable.

Como fue planteado anteriormente las bajas precipitaciones entre siembra y V₁₂ y la disminución de los niveles de humedad del suelo permiten explicar la fuerte relación entre el consumo y el IAF en los primeros estadios del cultivo. Luego, con una mayor cantidad de precipitaciones (Figura 1) las condiciones se igualaron en oferta hídrica (Figura 2), las diferencias de IAF se redujeron y por lo tanto el consumo de agua dejó de ser dependiente del valor de IAF.

Es importante aclarar que la relación entre el consumo de agua entre siembra y V₈ y el IAF del cultivo explica que por cada 1 punto de aumento en el IAF el consumo de agua para esa etapa aumenta en 22.48 mm. Además entre V₈ y V₁₂ la relación hallada fue de 29.62 mm por cada punto de aumento en el IAF. Considerando que modificaciones en el marco de plantación afectan el IAF, durante periodos de sequía progresiva, este aumento se tradujo en un mayor consumo de agua.

En la Figura 4 se puede observar que la biomasa aérea seca en R_6 tuvo una relación lineal con el consumo de agua calculado para todo el ciclo del maíz, aunque sólo el 43.52% de la biomasa puede ser explicada por diferencias en el consumo. Como fue planteado en párrafos anteriores es factible que la falta de diferencias estadísticas durante el periodo crítico para la determinación del rendimiento haya suavizado las diferencias evaluadas en los estadios previos y posteriores al mismo y con ello disminuido la correlación entre variables.

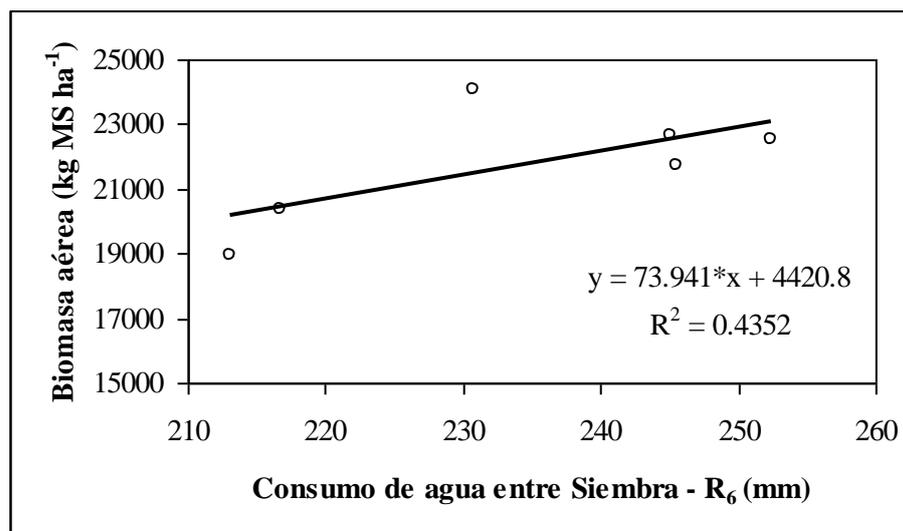


Figura 4: Relación entre la biomasa seca aérea en R_6 y el consumo de agua entre siembra – R_6 .

3.6. Rendimiento y eficiencia en el uso del agua (EUA)

La respuesta del rendimiento a la distancia entre hileras y densidad de plantas (Tabla 7) no fue significativa en ninguno de los tratamientos evaluados como tampoco se encontró interacción significativa DEH * DEN, a pesar de haber encontrado respuesta en otros parámetros que influyen en la determinación del rendimiento como son el IAF y el consumo de agua por etapas y total. Estos resultados contradicen lo planteado por algunos autores como Widdicombe y Thelen (2002) y Barbieri *et al* (2000), ya que en este caso los resultados en materia de rendimiento son nulos en función del marco de plantación en cualquiera de sus componentes.

Tabla 7: Rendimiento en grano (14,5% de humedad) según distancia entre hileras y densidad de plantas.

Tratamiento	Rendimiento (kg/ha)
DEH 70 cm	9569 a
DEH 52 cm	9313 a
DMS	489
DEN 45000 pl ha ⁻¹	9746 a
DEN 65000 pl ha ⁻¹	9326 a
DEN 85000 pl ha ⁻¹	9252 a
DMS	1033
P (DEN*DEH)	0.29
CV (%)	8.22

En columnas, valores en negrita y letras distintas indican diferencias significativas con una probabilidad del 5% según prueba DMS de Fisher. DMS, diferencia mínima significativa. DEH, distancia entre hileras. DEN, densidad de siembra. P (DEN*DEH) valor p de la interacción densidad de siembra por distancia entre hileras. CV (%), es el coeficiente de variación en %.

En lo que respecta al rendimiento, es importante remarcar que los mismos fueron elevados en relación a las condiciones ambientales y al consumo de agua durante el ciclo del cultivo, (9448.18 kg ha⁻¹ promedio de todo el ensayo) a pesar que durante el mismo solo se produjeron 248 milímetros de precipitaciones, evidenciando en coincidencia con lo planteado por Cárcova *et al.* (2004^a), la importancia que tienen las condiciones que se desarrollan durante el período crítico en la determinación del rendimiento. Seguramente la ausencia de diferencias en el consumo durante el período crítico, acompañada o fundamentada por las precipitaciones ocurridas alrededor y durante el mismo, anularon los efectos que podían llegar a provocar el mayor consumo previo a esta etapa en las mayores densidades de plantas. Estas hubieran definido el rendimiento con una reserva hídrica edáfica de menor magnitud que los tratamientos menos densos, con las consecuencias de disminución del mismo que esto hubiera traído aparejado. Referido a esto, seguramente los rendimientos hubieran manifestado diferencias significativas a favor de los tratamientos menos densos si la sequía progresiva que se venía desarrollando no hubiera sido interrumpida por las precipitaciones ocurridas justo alrededor del período crítico, situación que de alguna manera evitó un estrés de mayor trascendencia en los tratamientos con un mayor número de individuos por hectárea.

Tabla 8: Eficiencia en el uso del agua consumida (EUA) en la producción de biomasa y de rendimiento en grano

Tratamiento	EUA (kg MS mm ⁻¹)	EUA (kg grano mm ⁻¹)
DEH 70 cm	54.50 a	23.28 a
DEH 52 cm	51.45 a	22.79 a
DMS	8.62	1.74
DEN 45000 pl ha ⁻¹	48.10 a	23.85 a
DEN 65000 pl ha ⁻¹	56.12 a	22.84 a
DEN 85000 pl ha ⁻¹	54.71 a	22.41 a
DMS	8.79	2.50
P (DEN*DEH)	0.61	0.40
CV (%)	11.05	8.14

En columnas, valores en negrita y letras distintas indican diferencias significativas con una probabilidad del 5% según prueba DMS de Fisher. DMS, diferencia mínima significativa. DEH, distancia entre hileras. DEN, densidad de siembra. P (DEN*DEH) valor p de la interacción densidad de siembra por distancia entre hileras. CV (%), es el coeficiente de variación en %.. MS, materia seca.

Finalmente en la Tabla 8 se observa que en los tratamientos distanciados a 52 cm entre hileras la EUA para la producción de biomasa y granos no fue estadísticamente diferente a la encontrada en los tratamientos a 70 cm, como tampoco entre las diferentes densidades.

Los valores promedio encontrados de EUA para la producción de materia seca y grano (52.85 y 23.04 kg mm⁻¹ respectivamente) son levemente inferiores a los reportados para el mismo ambiente ecológico por Rivetti (2005), los cuáles se ubican en alrededor de los 29 kg grano mm⁻¹. Es factible que las condiciones de bajas precipitaciones durante el desarrollo del cultivo hayan generado una pequeña disminución en los valores de EUA

4. Conclusiones

Para las condiciones desarrolladas en el presente ciclo, el marco de plantación no generó diferencias en la producción de biomasa aérea, ni en el rendimiento. Si bien hubo modificaciones en el consumo de agua del maíz en los estadios iniciales de crecimiento, la reposición hídrica mediante precipitaciones durante el periodo crítico minimizó el efecto que el mismo podía llegar a causar en la producción.

El IAF del maíz fue alterado por los diferentes arreglos espaciales utilizados, principalmente en estadios fonológicos iniciales, aunque durante el período de determinación del rendimiento la magnitud de la modificación no fue la suficiente para justificar diferencias en la producción.

Un ítem importante de remarcar y que es conveniente seguir evaluando, por el impacto que tiene el costo de la semilla en la estructura de costos de producción en maíz, es la densidad de siembra ya que con el híbrido utilizado y con solo 45000 plantas por hectárea se lograron los mismos rendimientos que con 65000 y 85000. No obstante, se debe resaltar que las bajas precipitaciones de la campaña bajo estudio no permitieron encontrar incrementos de producción debidos al aumento de la densidad de plantas.

Para finalizar es importante remarcar la importancia de repetir el ensayo durante una serie de campañas de manera de evaluar el comportamiento de los parámetros evaluados en distintas situaciones desde el punto de vista de la oferta ambiental, para lograr conclusiones definitivas.

5. BIBLIOGRAFIA CITADA

- ANDRADE F. y J. M. GARDIOL 1994. Sequía y producción de los cultivos de maíz, girasol y soja. Boletín técnico N° 132. EEA INTA Balcarce.
- ANDRADE F., C. VEGA, S. UHART, A. CIRILO, M. CANTARERO y O. VALENTINUZ 1999. Kernel Number Determination in Maize. *Crop Sci.* 39:453–459
- ANDRADE F., CIRILO A., UHART S. y OTEGUI M. 1996. Densidad de plantas. En: *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Editorial Médica Panamericana. Capítulo 8.:227-254.
- ANDRADE F.; CALVIÑO P.; CIRILO A.; BARBIERI P. 2002. Yield responses to narrow rows depend on increased radiation interception. *Agron. J.* 94:975–980.
- ANDRADE, F., L. AGUIRREZABAL y R. RIZZALLI. 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. En: Andrade, F. y V., Sadras Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Ed. Médica Panamericana. Cap. 3: p. 61-96
- BARBIERI, P.; SAINZ ROZAS, H.; ANDRADE F.; ECHEVERRÍA H. 2000. Row spacing effects at different levels of nitrogen availability in maize. *Agron. J.* 92:283-288.
- CARCOVA J., L. BORRAS y M. OTEGUI 2004^a. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad del maíz. En: *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Ed. Satorre E. et al. Editorial Facultad de Agronomía. UBA. Capítulo 8.: 135-163.
- CARCOVA J., L. ABELEDO y M. LOPEZ PEREYRA 2004^b. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. En: *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Ed. Satorre E. et al. Editorial Facultad de Agronomía. UBA. Capítulo 6.: 72-98.
- CHIKOYE D., E. UDENSI and S. OGUNYEMI. 2005. Integrated Management of Cogongrass [*Imperata cylindrica* (L.) Ruesch.] in Corn Using Tillage, Glyphosate, Row Spacing, Cultivar, and Cover Cropping. *Agron. J.* 97:1164-1171.
- CIRILO A. 2004. Elección de híbridos de maíz y su respuesta a la densidad y distanciamiento. *Mundo Maíz. Actas del Congreso*. Bs. As.:29-35.
- CIRILO A. 2005. Distancia entre surcos: criterios para su manejo en el cultivo de maíz. VIII Congreso Nacional de Maíz. Rosario. Argentina.: 433-434.
- COX, W. 1996. Whole plant physiological and yield responses of maises to plant density. *Agronomy Journal*, 88: 489-496.
- DARDANELLI J D. COLLINO, M. OTEGUI y V. SADRAS 2004. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En: *Producción de granos*. Ed.: Satorre et al. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Capítulo 16.:377-405.
- FARNHAM D. 2001. Row spacing, plant density, and hybrid effects on corn grain yield

- and moisture. *Agron. J.* 93:1049-1053.
- GESUMARIA, J., C. CASTILLO, G. ESPOSITO y R. BALBOA. 2000. NP-ZEA Programa para el cálculo de dosis de nitrógeno y fósforo. Registro del derecho de autor DNDA Exp. 97476, 13-11-2000.
- HOWELL T. A. and J. A. TOLK 1998. Water use efficiency of corn in the U. Southern High Plains. 90th Annual Meeting of Agronomy, Land, Water and Biological Resources. ASA, CSSA and SSSA. Baltimore, MD.
- KARLEN, D. y C. CAMP. 1985. Row spacing, plant population and water management effects on corn in the Atlantic Coastal Plain. *Agron. J.* 77:393-398.
- KRUK B. y E. SATORRE. 2004. Densidad y arreglo espacial del cultivo. En: Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo. Ed. Satorre, E.; R. Benech Arnold; G. Slafer; E. B. de la Fuente; D. Miralles; M. Otegui y R. Savin. Editorial Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Buenos Aires. Capítulo 13.:279-316.
- LAMBERT, D. and J. LOWENBERG-DE BOER. 2003. Economic Analysis of Row Spacing for Corn and Soybean. *Agron. J.* 95:564–573.
- MADDONNI, G.; M. OTEGUI. 2006. Intra-specific competition in maize: Contribution of extreme plant hierarchies to grain yield, grain yield components and kernel composition. *Field Crops Research* 97.:155-166.
- MARCOS J. 2000. Simulation based assessment of alternative crops in the dry land Pacific Northwest. Thesis of Ph. D. in Soils. Washington State University. Department Crop and soils sciences. USA.
- MARCOS J. 2001 Sistema Suelo-planta. Agua en el suelo. Material de apoyo para el curso de grado: Sistema Suelo-Planta. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto.
- RITCHIE W. and J. HANWAY 1997. How a corn plant develops. Special Reports N° 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames, Iowa.:21 p.
- RIVETTI A 2005. Efecto del riego complementario sobre el rendimiento en grano de maíz y sus componentes VIII Congreso Nacional de Maíz. Trabajos presentados. Rosario. Argentina.: 36-39.
- RIVETTI A. 2004. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Tesis de la Maestría de Riego y Drenaje de la Universidad Nacional de Cuyo.
- SARQUIS, J. 1998. Yield response of two cycles of selection from a semiprolific early Maize population to plant density, sucrose infusion and pollination control. *Field Crops Res.* 55: 109-116.
- SATORRE E. 2005. El arreglo espacial de las plantas del cultivo de maíz. Tendencias y

- efecto en los planteos de la región pampeana. VIII Congreso Nacional de Maíz, Rosario.:430-432.
- SHARRATT, B. and D. MCWILLIAMS. 2005. Microclimatic and Rooting Characteristics of Narrow-Row versus Conventional-Row Corn. *Agron. J* 97:1129-1135.
- SLAFER G., A. KANTOLIC y D. MIRALLES 2004. Fisiología del rendimiento y la calidad. En: Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Ed. Satorre E. et al. Editorial Facultad de Agronomía. UBA. Capítulo 4.:51-57.
- TOTIS de ZELJKOVICH, L. y C. M. REBELLA 1980. Necesidades de agua de un cultivo de maíz en la región de Pergamino. En: AIANBA (ed.). Actas del II Congreso Nacional de Maíz.:211-219.
- VEGA, C. y F. ANDRADE 2000. Densidad de plantas y espaciamiento entre hileras. En: Andrade, F. y V. Sadras. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Ed. Médica Panamericana. Cap. 4, p.97-133.
- VILLALOBOS, F. y J. E. FERRERES 1990. Evaporation measurements beneath corn, cotton and sunflower canopies. *Agronomy Journal* 82:1153-1159.
- WIDDICOMBE, W., K. THELEN. 2002. Row width and plant density effects on corn grain production in the Northern Corn Belt. *Agron. J.* 94:1020-1023.