ITEA (1999), Vol. 95V N.º 3, 218-240

EFECTO DEL DÉFICIT DE SUMINISTRO DE AGUA EN EL RENDIMIENTO Y EN LA CALIDAD DE UN CULTIVO DE MAÍZ DULCE

J.A. De Juan Valero*[1]
C. Fabeiro Cortés*
F.J. Martín de Santa Olalla Mañas*
H. López Córcoles**

* Departamento de Producción Vegetal
y Tecnología Agraria
Universidad de Castilla-La Mancha
Campus Universitario, s/n
02070 Albacete
** Instituto Técnico Agronómico Provincial
(ITAP, S.A.)
Ctra. Madrid, s/n
02080 Albacete

España

RESUMEN

Existe un gran interés por la obtención de las funciones de producción respecto al agua recibida por los cultivos para optimizar el empleo de un recurso escaso y caro en las áreas regables de Castilla-La Mancha. Este hecho ha motivado que se estudien las respuestas productivas, cuantitativa y cualitativa, del cultivo de maíz dulce (*Zea mays* L. var. *rugosa* Bonaf, cv.'Jubileo') sometido a diferentes estrategias de programación de riego: deficitarias, deficitarias controladas y excedentarias.

El déficit hídrico produjo una notable reducción de los componentes del rendimiento cuantitativo (número de mazorcas comerciales por hectárea y peso medio unitario de las mismas), de las producciones de biomasa seca total aérea, de los rendimientos de mazorcas comerciales y de grano tierno, del índice de cosecha y de las dimensiones de la mazorca, pero mejoró el contenido de sólidos solubles (°Brix) del grano tierno y acortó su período de maduración comercial.

Las relaciones que mejor se ajustaron a los datos experimentales de la producción de materia seca total aérea, y rendimientos de mazorcas comerciales y de grano fresco, respecto al agua estacional (riego + lluvia efectiva) fueron de tipo expopolinómica de tercer grado, con valores de R^2: 0,97-0,98. Se observaron valores máximos de las variables de producción con volúmenes estacionales de agua comprendidos entre 385 y 410 mm.

El agua de riego parece que se aprovecha mejor durante el encañado y la maduración comercial del grano de maíz dulce.

1. Autor al que debe dirigirse la correspondencia.

Asimismo, se ha podido comprobar como, en general, los tratamientos hídricos más excedentarios generan los valores inferiores de eficiencia del agua de riego respecto a la variable productivas. En el extremo opuesto se encuentran las respuestas del tratamiento más deficitario, de estrés hídrico intenso y prolongado.

Palabras clave: *Zea mays* L. var. *rugosa* Bonaf, Tratamientos diferenciales, Producción, Funciones de producción, Eficiencia del agua aplicada.

SUMMARY

EFFECT OF WATER SUPPLY DEFICIT ON YIELD AND QUALITY OF A SWEET CORN CROP

There is a big interest in obtaining production functions versus received water by the crops, in order to optimise the use of this very scarce and expensive resource at the irrigation zones in Castilla-La Mancha. This fact has motivate to study the quantitative and qualitative production of sweet corn (*Zea mays* L. var. *rugosa* Bonaf, cv." Jubileo") under different strategies of irrigation scheduling.

Water deficit resulted in a remarkable decrease of the yield components (number of ears per hectare and average unitary ear weight). Other production parameters negatively affected by the lack of water were: total aerial dry matter production, marketable ears yield, spathed and unspathed, fresh grain yield, harvest index and ears dimensions. In the other hand, water deficit improved the soluble solids content (° Brix) in grains and shorted the commercial maturation period.

The experimental data of total aerial dry matter production, marketable ears yield and fresh grain yield versus seasonal water supply (including irrigation and effective precipitation) best fitted to 3rd degree expopolinomial functions with determination coefficients between 0.97- 0.98. The maximum values of the production parameters could be observed with seasonal water supply ranging 385 and 410 mm.

Irrigation water seemed to be more effective during the formation of the stalk and the maturation of sweet corn grains.

Likewise, it could be proved that, generally, the most overirrigated treatments originated the lowest irrigation water efficiency regarding the production. In the opposite end, the most deficitary treatment, with strong and extended water stress could be find.

Key words: Zea mays L. var. rugosa Bonaf., Irrigation treatments, Water deficit, Production, Production functions, Water applied efficiency.

Introducción

El maíz dulce (*Zea mays* L. var. *rugosa* Bonaf, sin. *saccharata* Bailey), originario del continente americano, es una gramínea de la misma especie que el maíz común utilizada para pienso, del que se diferencia, entre otras propiedades, por tener el grano aspecto rugoso, sabor dulce y algo transparente. Estas características del grano son consecuencia de la presencia de un gen recesivo en homocigosis que provoca una polimerización más lenta e incompleta de los azúcares en almidón (RODRIGO *et al.*, 1984). Hay cultivares híbridos con mayor contenido de azúcar que otros; el maíz superdulce lleva un gen "shrunker-2", mu-

tación que afecta negativamente la nascencia y el vigor de arranque de las plántulas (CANTLIFFE *et al.*, 1975). PEIRCE (1987) resalta el valor nutritivo del grano inmaduro, con valores máximos estándares, alcanzados por los constituyentes a lo largo del subperíodo de la formación de la cosecha, del 5-6 % para los azúcares totales (4% de azúcares no reductores), 10-12% para el almidón, 3% para los polisacáridos solubles, 3,5 % para las proteínas, 70 % para el agua y cantidades nada despreciables de potasio y vitamina A.

Recolectado sin haber alcanzado la madurez fisiológica, su calidad nutritiva, organoléptica y forma de consumo hacen que el grano fresco y la mazorca entera sean considerados como hortalizas. El cultivo de maíz dulce fue introducido en España a finales de los años 60 con objeto de destinar sus mazorcas frescas a la exportación (MAROTO *et al.*, 1991). Posteriormente, el cultivo se extendió a Castilla-La Mancha (Toledo, Albacete), Andalucía, Extremadura, Navarra y Murcia (Campo de Cartagena), principalmente para las industrias de fabricación de conservas y congelados.

El maíz dulce cultivado para la industria agroalimentaria es una especie importante dentro de la agricultura de regadío albacetense, donde se cultivan unas 1.500 has, bien como especie principal (cultivo único), bien como especie rastrojera (doble cultivo), siempre durante la campaña estival, cuando la demanda evaporativa de la atmósfera es elevada y prácticamente inexistentes las lluvias.

En las áreas geográficas de clima local mediterráneo semiárido, son muchos los factores vitales que influyen tanto en la producción cuantitativa como en la calidad de un importante número de cultivos y, en consecuencia, en sus rentabilidades económicas, pero el agua es, sin duda, el factor más limitante. Además, y desde el punto de vista de la agricultura sostenible, el agua es un recurso cada vez más escaso y caro que hay que conservar y utilizar eficientemente para manterner sistemas agrícolas de producción estables, elásticos y diversos, y no contaminar los acuíferos por el lavado del nitrógeno. Por todo ello, el ahorro y la buena gestión del elemento líquido es tema principal de estudio a fin de optimizar su uso dentro del marco de una agricultura sostenible.

El rendimiento comercial del maíz dulce mejora con la aplicación regular de agua de riego (PEIRCE, 1987), muy especialmente en el subperíodo abarcado por las fases de la emisión de las "sedas", fecundación y formación de la cosecha (CAROLUS y SCHLEUSENER, 1950; PEIRCE, 1987). A pesar de los trabajos desarrollados en este cultivo, no está consensuado cual sería la estrategia de programación de riegos que optimice los resultados económicos, siempre bajo el concepto y los fundamentos de una agricultura sostenible. Algunos investigadores (EVANS *et al.*, 1960; MACKAY y EAVES, 1962; BBRAUNWORTH y MACK, 1987a), con distintos criterios y métodos de programación de riegos, demuestran la existencia de un rango amplio de suministro estacional de agua de riego para el que los rendimientos del maíz son similares. PEIRCE (1987), como referencia, proporciona cifras de suministro total de agua (lluvia + riego) a la parcela de maíz dulce en el estado de Oregón (EEUU) que varían desde 300 a 410 mm, para los cultivares de ciclo corto, y desde 460-510 mm, para los cultivares de ciclo más largo. BRAUNWORTH y MACK (1987b) ponen en evidencia como la cantidad de agua recibida por la parcela de maíz dulce condiciona la calidad de la producción, principalmente por sus efectos en el

número de mazorcas comerciales por hectárea y en el tamaño de las mismas.

Dada la importancia de explicar el efecto del riego sobre el rendimiento de mazorcas comerciales del maíz dulce, cultivado bajo las condiciones semiáridas de Albacete, es conveniente conocer la estrategia de programación del riego más adecuada, así como su influencia sobre los componentes del rendimiento cuantitativo y otros parámetros agronómicos de calidad, como el número de mazorcas comerciales por hectárea, las dimensiones de las mismas y la humedad del grano, a fin de obtener un mejor conocimiento de dicha respuesta productiva.

El presente trabajo fue diseñado para estudiar el efecto de un amplio rango de tratamientos hídricos diferenciados sobre el comportamiento agronómico, especialmente sobre los componentes del rendimiento y la calidad de las mazorcas del maíz dulce cultivado en la provincia de Albacete, Castilla-La Mancha, bajo condiciones de clima mediterráneo continental. La información aquí desarrollada servirá para establecer programas de manejo del riego del maíz dulce.

Material y métodos

El experimento de campo se realizó durante la campaña agrícola del año 1996 en la finca "Las Tiesas", gestionada por el ITAP, S.A., ubicada en el término municipal de Albacete, España. El clima local de la zona, según la clasificación agroclimática de Papadakis, es Mediterráneo Templado (Me, TE). Los suelos de la parcela de ensayo son representativos de la zona , con un perfil: Ap1 (0-15 cm), Ap2(15-38 cm), Bwk (38-53 cm), Bk (70-96 cm), 2R (96-120 cm). La profundidad media es de 50 cm, limitada por el desarrollo de un horizonte petrocálcico, irregularmente fragmentado. La capa arable de textura franco-arcillo-arenosa, con un elevado contenido en arena fina (0,2-0,02 mm), tiene un pH básico, bajos niveles de materia orgánica y nitrógeno total, niveles medios de P_2O_5 asimilable, y altos contenidos de caliza activa y K_2O asimilable.

El dispositivo experimental consistió en un diseño estadístico de bloques al azar con cuatro repeticiones. El volumen estacional de agua aplicada mediante riego, y su reparto a lo largo del ciclo agronómico del cultivo de maíz dulce, fue el factor objeto del estudio (cuadro 1).

Las parcelas elementales del ensayo, de 22,4 m^2 de superficie, contenían 4 líneas de siembra de 8 m de longitud, separadas entre sí 0,7 m. Las dos líneas centrales de cada parcela elemental se dedicaron a la toma de datos en la recolección para la valoración de la cosecha.

'Jubileo', cultivar de grano amarillo, muy adecuado para consumo en fresco, enlatado y ultracongelado, fue sembrado mecánicamente el 21 de mayo, con una densidad poblacional de 7 plantas m^{-2}. Las restantes prácticas culturales fueron las normales de la zona e idénticas para todas las parcelas elementales. Se hicieron varios tratamientos con clorpirifos (48%) para frenar los ataques de áfidos. El cultivo se desarrolló sanamente, sin ataques de *Heliothis armigera* Hb., *Sesamia nonagrioides* Lef. y *Pyrausta nubilalis* Hb., plagas de frecuente incidencia en la zona que afectan directamente a la calidad comercial de las mazorcas. Cuando el 50% de las plantas de cada parcela elemental alcanzaron una fase del ciclo agronómico, la fecha se anotó:

CUADRO 1
DISTINTAS ESTRATEGIAS DE PROGRAMACIÓN DE RIEGOS ENSAYADAS EN EL CULTIVO DE MAÍZ DULCE
TABLE 1
DIFFERENT STRATEGIES OF IRRIGATION SCHEDULING USED IN THE SWEET CORN CROP

Etapas del ciclo de cultivo	Fechas	Kc[1]	Tratamientos hídricos diferenciados % ETc[2]							
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Establecimiento	21/05-25/06	0,40	100	100	100	100	100	100	100	100
8 hojas-80% cubrición del suelo	26/06-20/07	0,41-1,00	100	40	60	60	60	120	120	120
80% cubrición del suelo-formación de la cosecha	21/07-11/08	1,00	100	40	60	80	100	50	100	110
Maduración comercial (grano lechoso-pastoso)	12/08-27/08	1,00-0.88	100	40	60	100	80	25	90	110

(1) Coeficiente de cultivo, fijados siguiendo los criterios de DOORENBOS y KASSAM (1986).
(2) Evapotranspiración del cultivo, estimada según el método de DOORENBOS y PRUITT (1977).

siembra el 21 de mayo (día t); nascencia (t + 10), 8 hojas (t + 35), emisión de la panícula (t + 65), inicio de la formación de la espiga (t + 76), inicio de la maduración lechosa-pastosa del grano (t + 97), recolección el día 27 de agosto (t + 98).

Para la programación diaria del riego en cada uno de los tratamientos hídricos diferenciados se recurrió al método del balance hídrico simplificado, utilizando un programa informático de elaboración propia (MARTÍN DE OLALLA y DE JUAN, 1993), desarrollado según la metodología formulada por DOORENBOS y PRUITT (1977) y DOORENBOS y KASSAM (1986). La evapotranspiración de referencia (ETo), referida a una cubierta continua de gramíneas, se calculó diariamente mediante la fórmula semiempírica de Penman-Monteith (MANTOVANI, 1993). Los datos climáticos requeridos por el ensayo se registraron en una estación agroclimática automatizada, ubicada a menos de 500 m de la parcela experimental del maíz dulce.

Se consideraron nulas todas las precipitaciones diarias iguales e inferiores a 5 mm. Para estimar la precipitación efectiva (Pe) en los tratamientos hídricos supuestamente deficitarios, se valoraron como tal todas las cantidades de agua recogidas en el pluviómetro testigo a lo largo de la estación de riego, mientras que en el caso de los tratamientos hídricos testigo y supuestamente excedentarios se cuantificó en función del contenido de humedad del suelo existente en los días que acontecían las lluvias. Periódicamente, se contrastó la humedad volumétrica con una sonda de constante dieléctrica "Tektronix 1502 Metallic Time Domain Reflectometer" (Tektronia, Bear-

berton, Oregon, EE.UU.); en cada una de las estrategias de programación del riego, la medida de la humedad del suelo con la técnica de reflectometría con el tiempo (TDR) se efectuó inmediatamente antes de cada riego y una vez transcurrida 24 horas, con varillas de acero inoxidable de 15 y 30 cm de longitud (BAKER, 1990; VAN LOON *et al.*, 1990). Tales mediciones, en cada una de las parcelas elementales, se llevaron a cabo en 5 posiciones distintas: dos en la misma línea de siembra, a la altura del gotero y a una distancia de 25 cm del mismo, y otras tres entre las líneas de siembra, a 25, 50 y 70 cm de distancia del mismo gotero.

Mediante un aparato de placas, o membranas de presión (RICHARDS, 1941), se determinaron las características hidrológicas de los horizontes edáficos incluidos en los primeros 50 cm del perfil del suelo. Las capacidades de retención de agua en capacidad de campo ($\theta_{0,33}$) y punto de marchitamiento ($\theta_{1,5}$) fueron 2,34 y 1,19 mmcm^{-1}, mientras que el intervalo de humedad disponible (IHD) del suelo experimental, o agua disponible entre los límites de capacidad de campo y punto de marchitamiento, se cuantificó en 1,15 mmcm^{-1} (49,15%, $\theta_{0,33}$). Tanto $\theta_{0,33}$ como $\theta_{1,5}$ fueron corroboradas mediante distintas expresiones empíricas (RAWLS *et al.*, 1982; GUPTA y LARSON, 1989); la densidad aparente del suelo considerada fue 1,35 gcm^{-3}.

DOORENBOS y KASSAM (1986), BRAUNWORTH y MACK (1987b) y LAMM *et al.* (1994), entre otros autores, sugieren, tanto para el maíz grano como para el maíz dulce, que, cuando las condiciones evaporativas de la atmósfera son elevadas, el agotamiento del agua del suelo en la zona de desarrollo radicular de un 45-55% de agua disponible tiene un efecto pequeño sobre el rendimiento, pudiendo ser interesante llegar a valores superiores durante la etapa inicial del ciclo para favorecer el desarrollo rápido y profundo del sistema radicular. En el presente trabajo, el nivel permisible de agotamiento de agua del suelo se fijó, para todo el ciclo del cultivo, en el 35 % del agua útil; en consecuencia, para los primeros 50 cm del perfil del suelo, el agua fácilmente utilizable, o dosis neta de riego, fue 20 mm. En cada estrategia de programación del riego, y para cada etapa del ciclo del maíz dulce, con las supuestas ETc definidas (cuadro 1), se regaba cuando, como consecuencia del correspondiente balance hídrico, la dosis neta de riego (20 mm) se agotaba.

Se ha recurrido al riego localizado, en su variante tecnológica de goteo, para la aplicación de la dosis neta de riego en cada una de las parcelas elementales, dada las numerosas ventajas agronómicas que ofrecen estos sistemas de riego en el cultivo de maíz para grano, ya se dispongan sus elementos básicos de distribución del agua en la superficie del terreno o enterrados (SAFONTAS y DI PAOLA, 1985; CAMP *et al.* 1989; CALDWELL *et al.*, 1994). Sin embargo, no existe acuerdo en definir la separación entre ramales portagoteros; mientras LAMM *et al.* (1995) encuentran ahorro de agua del 25%, sin importantes repercusiones en el rendimiento de maíz grano, cuando los ramales portagoteros se dispusieron cada dos líneas de siembra, a una distancia entre sí de 1,50 m, CAMP *et al.* (1993) consideran que esta separación sólo es válida en riego subterráneo y para especies hortícolas. En el presente trabajo, se utilizaron goteros autocompensantes de 3,5 l hora^{-1} a la presión nominal de diseño, situados a 50 cm en los ramales portagoteros. Estos ramales, de tubería RAM y diámetro 17 mm, se colocaron cada dos líneas de siembra. La dosis neta de riego aplicada en cada

parcela elemental se controló mediante válvulas de esfera de $^1/_2$ pulgada de diámetro, instaladas en las líneas terciarias, y dos tipos de contadores: de chorro múltiple, transmisión magnética y error de lectura ± 5% entre 30 y 120 l hora^{-1}, y de chorro simple, transmisión mecánica y error de lectura ± 5% entre 30 y 120 l hora^{-1}, y de ± 2% cuando pasa de 130 l hora^{-1}.

Hasta el 13 de junio no se inició la programación de riego con los criterios y métodos establecidos. Desde la siembra hasta esa fecha, se aplicaron 25 mm de agua de riego mediante aspersión, determinando la cantidad de agua aplicada a toda la parcela experimental mediante pluviómetros.

En la recolección se cortaron las plantas de las dos líneas centrales de cada parcela elemental, eliminando dos plantas situadas en los extremos de cada una de ellas. De las plantas objeto de análisis se consideraron los siguientes parámetros cuantitativos y cualitativos: número de plantas m^{-2}; número de mazorcas comerciales por m^2 (se eliminaron aquellas que carecían de tamaño comercial, inacabadas y con malos cuajados de grano); peso unitario de las mazorcas frescas comerciales, con y sin espatas; peso fresco del resto del sistema aéreo de la planta (sin mazorcas comerciales), pero también el de aquellas que se dejaron con mazorcas no válidas para el mercado.

En el laboratorio se determinó el contenido en materia seca de 10 plantas enteras, excluyendo las mazorcas comerciales, pero considerando las no comerciales, desecándose en estufa de aire forzado a 65° hasta peso constante, pesándose al término del proceso.

También, en laboratorio, y sobre un número de 12 mazorcas comerciales por parcela elemental, se realizó la toma de datos de los parámetros agronómicos siguientes:

- Se separaron los granos del resto de los componentes de las mazorcas y ambas fracciones se desecaron en estufa de aire forzado a 105° hasta peso constante.

- Longitud y diámetro basal de las mazorcas frescas, con y sin espatas.

- La concentración de sólidos solubles se midió en un refractómetro utilizando el triturado obtenido tras batir los granos basales, apicales y situados en la zona media por separado, expresándose los resultados en °Brix, teniendo en consideración la corrección relativa a la temperatura ambiente del lugar de las mediciones. Estas valoraciones sólo se realizaron sobre tres mazorcas de cada parcela elemental.

Las funciones de producción se utilizan para describir la relación existente entre el rendimiento cuantitativo y la cantidad de agua aplicada con el riego, recibida por la parcela bajo los conceptos de riego y lluvia, o consumida por el cultivo. Tales funciones son útiles para evaluar el impacto de los déficits de riego en la producción de cultivos (STEWART *et al.*, 1977; VAUX *et al.*, 1981; GARRITY *et al.*, 1982; MILLER y BURKE, 1983; STEGMAN, 1983). En el presente trabajo experimental, se analiza la relación existente entre diversos parámetros del rendimiento cuantitativo y el volumen estacional de agua recibida por las parcelas (riego + lluvia) en todos, y cada uno, de los tratamientos hídricos diferenciados.

STEGMAN (1982) evalúa la eficiencia de las estrategias de programación del riego mediante la expresión:

$$IE = Y/I \qquad [1]$$

donde: IE = eficiencia de la aplicación del agua de riego, Y= rendimiento comer-

cial, e I= volumen estacional de agua aplicada mediante el riego.

La ecuación [1] se ha utilizado en este estudio para calcular las distintas eficiencias de las estrategias de programación del riego planteadas en la experiencia, referidas a la producción de biomasa seca (IE_{MS}), a la producción de mazorcas frescas comerciales (IE_M) y a la producción de grano tierno (IE_G).

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) según un diseño en bloques azar con cuatro repeticiones, utilizando como herramienta el paquete estadístico "Statistical Analysis System, SAS", versión 6.11 (SAS Institute Inc., 1995). La comparación de medias se realizó mediante el test de DUNCAN (STEEEL y TORRIE, 1985). Para el establecimiento de las funciones de producción *versus* agua recibida por las parcelas se ha recurrido a la técnica de regresión no-lineal (HUET *et al.*, 1992), analizando diferentes modelos matemáticos mediante la herramienta estadística STAT-ITCF (ITCF, 1989).

Resultados y discusión

La temperatura media registrada durante la campaña de ensayo, de 21,9 °C, fue algo superior a la del año medio de la serie climática 1974-1993, cifrada en 20,9 °C. Son de destacar las temperaturas mínimas, inferiores a 9 °C, que se alcanzaron en los días 20-25 de junio, cuando el maíz dulce tenía 6-7 hojas, y las temperaturas máximas, de 37 a 42 °C, registradas en los días 19-25 de julio, coincidiendo con la emisión del polen y la fecundación del cultivo, acompañadas de humedades relativas del aire bajas (10 a 20%, de valores mínimos) y velocidades diurnas del viento de 4 a 6 ms^{-1}. La precipitación acumulada durante la estación de crecimiento y desarrollo del maíz dulce fue 72 mm, valor inferior a la acumulada en el año medio de los 20 años de referencia, que fue 115 mm.

El cuadro 2 presenta los volúmenes estacionales de agua de riego y recibidos en cada tratamiento hídrico diferenciado.

El reparto del volumen total de agua recibida por cada estrategia en los diferen-

CUADRO 2
RIEGOS Y AGUA ESTACIONAL RECIBIDA EN CADA TRATAMIENTO HÍDRICO DIFERENCIADO
TABLE 2
IRRIGATION AND SEASONAL WATER RECEIVED BY EACH TREATMENT

Tratamiento hídrico diferenciado	Número de riegos	Agua de riego (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Riego + lluvia (mm)
T1 (100/100/100/100)	19	309	43	352
T2 (100/40/40/40)	12	143	72	215
T3 (100/60/60/60)	14	185	72	257
T4 (100/60/80/100)	17	241	72	313
T5 (100/60/100/80)	17	250	72	322
T6 (100/120/50/25)	15	211	72	283
T7 (100/120/100/90)	20	349	43	392
T8 (100/120/110/110)	21	369	43	412

tes etapas que se ha desglosado el ciclo agronómico del maíz dulce (cuadro 1), se recogen en el cuadro 3.

La densidad poblacional es el componente del rendimiento más limitante de la expresión potencial del maíz (FLEURY, 1991). En el momento de la recolección, esta variable agronómica osciló entre 6 y 6,8 plantas m^{-2}, sin que estas diferencias sean significativas estadísticamente (cuadro 4). Las marras de nascencia y la falta de vigor de arranque han sido determinantes de la caída poblacional, adversidades muy frecuentes en el cultivo del maíz dulce, principalmente en los cultivares "superdulces" (PARERA y CANTLIFFE, 1994). La aplicación del agua de riego mediante el sistema de aspersión, dispuesto en la superficie del terreno, podría haber contribuido, por su falta de uniformidad y su acción favorecedora del encostramiento, a acrecentar la mortandad de las plántulas antes de su implantación, principalmente en suelos de estructura inestable.

El maíz dulce es una gramínea con tendencia al ahijamiento (desarrollo de brotes secundarios) que no tiene interés agrícola por no dar mazorcas bien desarrolladas como el tallo principal. La prolificidad de esta experiencia ha sido muy pequeña, entre 0,042 (T4) y 0,12 (T8) hijuelos por planta implantada, valores medios cuyas diferencias no son significativas estadísticamente pero que muestran una tendencia favorecedora de los tratamientos hídricos bien dotados de agua (cuadro 4). El cultivar elegido, la elevada densidad poblacional conseguida y las temperaturas frías del suelo durante las primeras fases del maíz dulce en su ciclo, podrían explicar las

CUADRO 3
REPARTO DEL VOLUMEN TOTAL DE AGUA (RIEGO + LLUVIA, MM) RECIBIDA POR LAS PARCELAS EN LAS DIFERENTES ETAPAS DEL CICLO AGRONÓMICO DEL MAÍZ DULCE
TABLE 3
PARTITION OF TOTAL WATER VOLUME (IRRIGATION + RAINFALL, MM) RECEIVED AMONG THE DIFFERENT STAGES OF AGRONOMIC CYCLE OF SWEET CORN

Tratamiento hídrico diferenciado	Siembra-8 hojas	8 hojas- 80% de cubrición del suelo	80% cubrición del suelo-formación de la cosecha	Maduración lechosa-pastosa del grano
T1 (100/100/100/100)	50 (14,20%)[1]	100 (28,41%)	133 (37,78%)	69 (19,61%)
T2 (100/40/40/40)	75 (34,8%)	42 (19,53%)	60 (27,91%)	38 (17,68%)
T3 (100/60/60/60)	75 (29,18%)	55 (21,40%)	92 (35,80 %)	35 (13,62%)
T4 (100/60/80/100)	75 (23,96%)	55 (17,57%)	113 (36,10%)	70 (22,37%)
T5 (100/60/100/80)	75 (23,29%)	55 (17,08%)	133 (41,30%)	59 (18,33%)
T6 (100/120/50/25)	75 (26,50%)	117 (41,34%)	72 (25,44%)	19 (6,72 %)
T7 (100/120/100/90)	75 (19,13%)	117 (29,85 %)	136 (34,69%)	64 (16,33%)
T8 (100/120/110/110)	50 (12,14%)	117 (28,40%)	161 (39,08%)	84 (20,39%)

(1) Las cifras entre paréntesis representan las participaciones porcentuales en el volumen total de agua de cada estrategia de programación del riego.

CUADRO 4
NÚMERO DE MAZORCAS COMERCIALES COMO RESPUESTA A LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS HÍDRICOS
TABLE 4
MARKETABLE COBS NUMBER AFFECTED BY WATER TREATMENT

Tratamiento hídrico diferenciado	Densidad poblacional número ha^{-1}	Hijuelos número ha^{-1}	Plantas estériles número ha^{-1}	Mazorcas defectuosas número ha^{-1}	Mazorcas comerciales número ha^{-1}
T1 (100/100/100/100)	61904	5357	4464d	2976	59821b
T2 (100/40/40/40)	66964	3274	16333a	7774	46131d
T3 (100/60/60/60)	59524	2976	11300b	4176	47024cd
T4 (100/60/80/100)	63095	2679	5952d	2382	57440b
T5 (100/60/100/80)	67559	5060	7142c	4763	60714ab
T6 (100/120/50/25)	64881	3571	10988b	6571	50893c
T7 (100/120/100/90)	66667	5400	5655d	4210	62202a
T8 (100/120/110/110)	61310	7440	1190e	4261	63399a
Nivel sign. estadística	ns	ns	5%	ns	5%

Nota: Valores con la misma letra son estadísticamente iguales en el test de Duncan.

pequeñas cifras obtenidas en la recolección. En cultivo tradicional, normalmente, pueden aparecer hasta tres mazorcas por planta. La primera es la que se origina a mayor altura, la que más se desarrolla y la que se recolecta antes, mientras que la última no llega normalmente a formar grano. Para BIANCHI (1969), sobrepasar 4,5 plantas m^{-2} en cultivares precoces supone una pérdida de rendimiento en número y peso de las mazorcas por planta, aunque el rendimiento total aumente (MOSLEY, 1973).

En el cultivo actual de maíz dulce, más de una mazorca por planta significa frecuentemente una disminución del porcentaje de maíz utilizable, porque la mazorca baja, menos desarrollada, da lugar en la recolección mecánica a una mezcla de mazorcas maduras e inmaduras. De aquí que aconsejen algunos autores (p.e., DERIEUX *et al.*, 1987) aumentar las densidades poblacionales hasta 11 plantas m^{-2} con cultivares tardíos y en condiciones de cultivo no limitante, para reducir la prolificidad de espigas, pero siempre que el cultivar, además, sea resistente al encamado. Sin embargo como señalan LORGEOU y GOYTINO (1991), un exceso de densidad poblacional puede provocar una competencia exacerbada de las plantas por el agua, los nutrientes minerales y la luz, e inducir un aumento del número de plantas estériles. En las condiciones edafoclimáticas del ensayo, el cultivar 'Jubileo' ha sido afectado por la disponibilidad de agua en el suelo, variando el número de plantas estériles entre 0,019 (T8) y 0,244 (T2) plantas por planta implantada. Las restricciones hídricas intensas y prolongadas desde la fase de 8 hojas son causantes del mayor número de plantas afectadas, pero también es importante un déficit intenso en la etapa que se inicia con la cubrición del suelo en un 80% de la

superficie. Una importante reducción del porte y superficie foliar podría explicar la incapacidad de la planta para producir, al menos, una mazorca comercial en los tratamientos más restrictivos.

Las distintas estrategias de riego no han inducido diferencias significativas en el número de mazorcas defectuosas por hectárea, por otro lado cifras poco importantes. En los tratamientos más restrictivos (T2, T3 y T6) los hijuelos han sido incapaces de llenar completamente el grano y han generado mazorcas con granos no alineados y con fallos en la formación del grano; además ha habido mazorcas del tallo principal con llenado incompleto de granos y con defectos de color como presencia de granos blancos y amarillos en la misma mazorca. Es de reseñar la presencia de mazorcas con el ápice inmaduro en los tratamientos hídricos supuestamente bien dotados de agua, muy principalmente en el más excedentario (T8).

Como puede observarse en el cuadro 5, la mayor producción por unidad de superficie se alcanzó en el tratamiento hídrico T8, teóricamente regado con exceso de agua, seguido de T1 y T7, si bien no se han encontrado diferencias significativas entre los valores medios de los tres tratamientos, cuando el rendimiento se ha expresado en $kgha^{-1}$ de mazorcas frescas sin perfollas.

El volumen estacional de agua de riego aplicado para conseguir los máximos rendimientos varió entre 309 y 369 mm, cifras próximas a las recomendadas por WATTS *et al.* (1968), quienes consiguen producciones máximas en Willamette Valley (Oregón, EE.UU.) con 338 mm. Sin embargo, el suministro estacional aplicado en otras experiencias con este fin fue superior (EVANS *et al.*, 1960; MILLER y BOERSMA, 1966), entre 332 y 513 mm, según cultivar, condiciones climáticas del año, naturaleza del suelo y prácticas culturales. MOLINA (1990) evalúa las necesidades medias del maíz dulce en 4 mm $día^{-1}$, y estima unas "necesidades hídricas" del orden de 200 mm para su cultivo en el Campo de Cartagena (España).

EVANS *et al.* (1960) obtienen rendimientos máximos de 17 tha^{-1} de mazorcas sin brácteas, cifra que es superada en otras investigaciones llevadas a cabo. Por ejemplo, PETERSEN *et al.* (1985) muestran a través de sus funciones de producción *versus* agua recibida por cada tratamientos hídrico diferenciado (riego + lluvia), rendimientos máximos de 13 a 20 tha^{-1} de mazorcas comerciales con volúmenes de agua que, dependiendo del sistema de laboreo (convencional, banda, no-laboreo), osciló entre 400 y 500 mm; por encima de estas referencias cifradas, los rendimientos disminuyeron ligeramente. En la experiencia de BRAUNWORTH y MACK (1987b), los rendimientos máximos, en torno a 21 tha^{-1}, se alcanzan con una amplia gama de suministro estacional de agua de riego, entre 311 y 599 mm.

El menor número de mazorcas comerciales por hectárea obtenido en este trabajo es el componente del rendimiento más determinante del hecho que los rendimientos máximos sean inferiores a los referidos por la literatura consultada, tanto española (RODRIGO *et al.*, 1984; MOLINA, 1990) como foránea. Frente a valores de 7,3-7,5 mazorcas m^{-2}, obtenidas, por ejemplo, por BRAUNWORTH y MACK (1987a,b), las cifras del presente trabajo para los tratamientos teóricamente menos restrictivos oscilaron entre 6 y 6,3 mazorcas m^{-2} (cuadro 4).

Los bajos rendimientos de mazorcas que se alcanzan en los tratamientos hídricos más deficitarios (cuadro 5) tienen mucho

CUADRO 5
PARÁMETROS DEL RENDIMIENTO CUANTITATIVO DEL MAÍZ DULCE SOMETIDO A DIFERENTES ESTRATEGIAS DE PROGRAMACIÓN DE RIEGO
TABLE 5
QUANTITATIVE YIELD PARAMETERS OF SWEET CORN UNDER DIFFERENT STRATEGIES OF IRRIGATION SCHEDULING

Tratamiento hídrico diferenciado	Peso mazorca fresca con brácteas (g)	Rendimiento fresco ($kgha^{-1}$)		Peso fresco de granos ($kgha^{-1}$)	Biomasa aérea total seca ($kgha^{-1}$)	Índice de cosecha[1] (%)
		Con espatas	Sin espatas			
T2 (100/40/40/40)	160,03d	7395d	6149c	3998c	5888c	37,22c
T3 (10/60/60/60)	173,17d	8143d	6004c	4055c	5937c	39,59c
(100/120/50/25)	170,01d	8655d	7423bc	5229bc	7029b	37,60c
T5 (100/60/100/80)	193,19c	11719c	9331b	6074b	7849b	44,47b
T4 (100/60/80/100)	213,20c	12264c	9255b	6264b	7382b	42,68b
T1 (100/100/100/100)	243,21b	14552b	12449a	8519a	9263a	49,92a
T7 (100/120/100/90)	247,22b	15412b	11778a	8296a	9700a	49,90a
T8 (100/120/110/110)	283,54a	17776a	13195a	8830a	9084a	50.12a
Nivel sign. estadística	1%	1%	1%	1%	1%	1%

(1) Cociente entre la producción de materia seca de las mazorcas con espatas y la producción de biomasa seca aérea total.
Nota: Los valores con la misma letra son estadísticamente iguales en el test de Duncan.

que ver con el bajo número de mazorcas comerciales (entre 4,6 y 5,0 mazorcas m^{-2}) y, en menor medida, con el reducido peso unitario de la mazorca fresca con brácteas (entre 160 y 170 g), conclusión a la que llegan también MACGILLIVRAY (1949), PETERSON y BALLARD (1953) y VITTUM *et al.* (1959). Los déficits hídricos continuados e intensos a lo largo de gran parte del ciclo de cultivo de maíz dulce (tratamientos T2 y T3) y los provocados en los dos últimos subperíodos (tratamiento T6) son los de consecuencias más negativas. STEGMAN (1982) llega a la conclusión que los máximos rendimientos del cultivo de maíz para grano se obtienen cuando el nivel permisible de agotamiento de agua en el suelo, en la zona de desarrollo radicular, no descienden por debajo de 80-90% del agua útil, o intervalo de humedad disponible, durante el subperíodo comprendido entre las fases de 12 hojas y maduración lechosa-pastosa del grano, cifras superiores a las dadas por DOORENBOS y KASSAM (1986), quienes consideran, para un subperíodo similar del ciclo, valores de 45-55%.

Al igual que VITTUM *et al.* (1959) y STANBERRY *et al.* (1963), la producción de grano fresco obtenida en este experimento disminuye cuando lo hace el suministro estacional de agua aplicada mediante riego.

Los efectos del estrés hídrico continuado e intenso sobre el crecimiento del maíz dulce se manifiestan nítidamente, a través de los rendimientos de biomasa áerea total

seca, en los tratamientos T2 y T3 (cuadro 5), aproximadamente un 60% de los mejores resultados obtenidos. La reducción del porte de las plantas y del área foliar a valores insuficientes para permitir una buena interceptación de la radiación en las etapas posteriores del ciclo, junto con una precoz e intensa senescencia, y una parada intensa del llenado del grano, podrían justificar los bajos rendimientos de mazorcas comerciales y de grano fresco obtenidos en la experiencia. El intenso déficit hídrico impuesto en el tratamiento hídrico T6, a partir del estado de 14-15 hojas, ha tenido menos efectos negativos que en los casos anteriores, pero, como cabría esperar, más repercusión en los rendimientos de mazorcas y de granos que en los de biomasa seca aérea total ; aunque DAYNARD *et al.* (1969), HUME y CAMPBELL (1972), JURGENS *et al.* (1978) y JONES y SIMMONS (1983), entre otros muchos investigadores, demuestran que el maíz moviliza frecuentemente los hidratos de carbono almacenados previamente en las partes vegetativas hacia los granos cuando las condiciones de estrés hídrico sobrevienen durante el subperíodo de engrosamiento del grano, un intenso déficit hídrico durante la etapa de llenado de grano, al que ha precedido un fuerte estrés hídrico en la formación de la cosecha, como en el caso planteado en la estrategia T6, y más si viene acompañado de temperaturas elevadas, podría haber dificultado la translocación hacia los granos y la utilización por parte de éstos de los asimilados almacenados en el tallo que se ha desecado rápidamente. El tallo no ha podido cumplir con las funciones que le asignan QUATTAR *et al.* (1987) en la continuidad y perpetuación del crecimiento del grano de maíz sometido a déficit hídrico: ni ha suplido con sus asimilados almacenados a la fotosíntesis neta reducida o anulada por falta de humedad en el suelo, ni ha servido como tampón entre las hojas senescentes y los granos en crecimiento para el mantenimiento de un estado hídrico favorable.

Como puede observarse en el cuadro 5, el maíz dulce presenta una cierta tolerancia al estrés hídrico en el subperíodo de encañado (tratamiento T5), e incluso en su prolongación hasta la fecundación y formación de la cosecha (tratamiento T4), pero no tan importantes como indican los resultados de DEUMIER *et al.* (1991). Estos investigadores, desde su experimento con maíz para grano, comprueban como el estrés hídrico durante el encañado provoca una reducción del crecimiento, que se traduce en una pérdida del 25% de la biomasa aérea al final de la floración femenina, sin ninguna repercusión en el rendimiento de grano. En este trabajo, además de la caída de la biomasa seca total aérea hasta un 24 %, el estrés hídrico planteado durante el encañado y prolongado hasta la formación de la cosecha (tratamiento T4) reduce los rendimientos de mazorcas con brácteas en un 32 % y de grano en fresco en un 29%, mientras que el déficit hídrico planteado durante el encañado al que se añade otro menos intenso durante el llenado del grano (tratamiento T5) lo hace en un 35% y 31 %, respectivamente.

HOWELL *et al.* (1990) enumeran cuatro vías posibles para mejorar la utilización eficiente del agua por parte de los cultivos, destacando entre ellas el aumento del índice de cosecha ("Harvest Index", HI), o relación porcentual existente entre el rendimiento comercial y la producción total de materia seca del cultivo. En los tratamientos hídricos testigo y supuestamente excedentarios, la materia seca de las mazorcas comerciales supone casi el 50% del peso seco de la materia seca total aérea producida, no llegando al 40% en las estrategias de programación de riego planteadas con défi-

cits hídricos intensos y prolongados a lo largo de gran parte del ciclo de cultivo. Considerando la producción de materia seca de los granos, el HI osciló entre el 29 % del tratamiento supuestamente más excedentario hasta el 22% de los tratamientos hídricos más deficitarios.

En cuanto a los parámetros de calidad de las mazorcas comerciales (cuadro 6), existen claras diferencias significativas en lo que se refiere al contenido de sólidos solubles (°Brix), superior en los tratamientos hídricos deficitarios, y mayor cuando dichos déficits hídricos se producen en el subperíodo de maduración comercial del grano. A similares conclusiones llegan otros autores trabajando con otras especies hortícolas, tal es el caso, a título de ejemplo, del tomate (SAN MARTÍN *et al.*, 1994) y del melón (RIBAS *et al.*, 1998). Sin embargo, pudiera ser que este comportamiento se debiera, más que al aumento de azúcares translocados a la espiga por la acción del estrés hídrico, a un acortamiento del subperíodo de llenado del grano por aceleración de los procesos de maduración, motivada por las altas temperaturas (máximas superiores a 32°C) acompañadas de vientos secos (humedades relativas mínimas entre 11 y 35%) durante al menos 7 días de esta etapa del ciclo. Esta adversidad es corroborada por los bajos contenidos de sólidos solubles con que se recolectan los granos frescos en todos los tratamientos hídricos diferenciados, entre 19,09 y 23,06 °Brix, afectando más a los supuestamente bien dotados de agua. El índice de refracción en la madurez de una cosecha normal es de 21 a 32 °Brix (DELACROIX, 1974; RODRIGO *et al.*, 1984).

Es de reseñar como los granos, a medida que alejan su posición de la zona basal de la mazorca, muestran pequeñas diferencias en el índice de refracción (cuadro 6), cualquiera que sea el tratamiento hídrico al que han estado sometido, siendo los granos situados en la posición apical de la mazorca, frente a los de la zona media y basal, los de menor contenido en sólidos solubles.

El grado de madurez del maíz dulce no sólo viene dado por el contenido en azúcares, sino también por el porcentaje de humedad del grano. Durante el proceso de maduración, como ya se ha indicado, los azúcares se transforman en almidón, y la humedad del grano disminuye, procesos que pueden ser acelerados por los déficits de humedad del suelo y/o temperaturas elevadas y vientos secos. Si tenemos en consideración las referencias dadas por BIANCHI (1969) e INGLETT (1970), quienes consideran como madurez adecuada para procesar maíz tipo grano entero un contenido en humedad de los granos del 73 al 74% y del 71 al 75%, respectivamente, los resultados de este experimento, entre el 67,29 y 69,77 %, confirmarían una sobremadurez de los mismos. Sin embargo, WEI *et al.* (1967) consideran unos márgenes más amplios como idóneos para industrializar, entre el 67 y 86%, y WADE *et al.* (1950) dan como inmaduros los granos con un contenido de humedad superior al 73% y como sobremadurados aquellos que tienen un contenido de humedad inferior al 67% Los valores obtenidos en el ensayo se pueden considerar como adecuados para industrializar.

El tamaño de las mazorcas se define por la longitud media y el diámetro medio de las mismas. Ambas dimensiones difieren significativamente con los tratamientos hídricos diferenciados ensayados. El riego favorece tanto la longitud media como el diámetro medio de las mazorcas frescas (cuadro 6), conclusión que está apoyada por los resultados obtenidos por BRAUNWORTH y MACK (1987b). Las mazorcas des-

CUADRO 6
PARÁMETROS DEL RENDIMIENTO CUALITATIVO DEL MAÍZ DULCE SOMETIDO A DIFERENTES ESTRATEGIAS DE PROGRAMACIÓN DE RIEGO
TABLE 6
QUALITATIVE YIELD PARAMETERS OF SWEET CORN UNDER DIFFERENT STRATEGIES OF IRRIGATION SCHEDULING

Tratamiento hídrico diferenciado	°Brix[1]			Humedad del grano (%)	Longitud de las mazorcas (cm)	Diámetro de las mazorcas (cm)
	(A)	(B)	(C)			
T2 (100/40/40/40)	22,88a	22,94a	23,04 a	67,29b	14,32d	3,82c
T3 (10/60/60/60)	22,82a	23,95a	23,06 a	67,90b	14,28d	3,82c
T6 (100/120/50/25)	22,32a	22,96a	22,84 a	67,63b	15,67c	3,99bc
T5 (100/60/100/80)	22,09a	22,44a	22,52 a	68,70ab	16,13b	4,02b
T4 (100/60/80/100)	21,23b	21,30b	21,32 b	69,21a	16,50b	4,13b
T1 (100/100/100/100)	19,09c	20,18c	20,42 c	68,99a	17,71a	4,41a
T7 (100/120/100/90)	20,39bc	20,47c	20,87 c	69,04a	17,71a	4,42a
T8 (100/120/110/110)	19,67c	20,08c	20,37 c	69,77a	18,45a	4,55a
Nivel sign. estadística		5%		5%	1%	1%

(1) (A), (B) y (C) posiciones apical, media y basal, respectivamente, de los granos en la mazorca.
Nota: Los valores con la misma letra son estadísticamente iguales en el test de Duncan.

tinadas a la conserva deben tener una longitud de 17-23 cm, con 16-20 filas de granos (RODRIGO *et al.* , 1984), dimensión que sólo es superada por los tratamientos hídricos mejor dotados de agua, a los que corresponde un diámetro medio entre 4,41 y 4,55 cm.

Las funciones de producción respecto al agua están representadas por una curva en la cual el rendimiento comercial de un cultivo, o la producción total de biomasa seca, se expresa en función del agua estacional consumida por el cultivo o del volumen estacional de agua aplicada mediante la técnica del riego, admitiendo que el resto de variables agronómicas que definen el proceso productivo agrícola permanecen constantes (DE JUAN y MARTÍN DE SANTA OLALLA, 1993).

Generalmente, la función que liga la producción con la evapotranspiración estacional está representada por una línea recta, mientras que su relación con el volumen estacional de agua de riego es de naturaleza curvilínea (STEWART y HAGAN, 1973). STEGMAN (1986) confirma el trazado convexo de estas funciones, así como su mayor variabilidad frente a las funciones de producción respecto al volumen estacional de agua consumida, lo que justifica por las deficientes eficiencias de los sistemas de aplicación del agua de riego a la parcela, las inexactitudes de los métodos de programación del riego y por la poca fiabilidad que tienen la predicción de la lluvia efecti-

va, principalmente bajo los climas húmedos y subhúmedos. Estas funciones de producción no son únicas para cada cultivo, ya que son muchos los factores de diversa naturaleza (genéticos, climáticos, edáficos y fitotécnicos) que regulan su crecimiento y desarrollo, también afectados por la intensidad, duración y momento del ciclo en el cual se produce el déficit hídrico (VAUX y PRUITT, 1983). A pesar de estos inconvenientes, la variable agua aplicada mediante el riego es la más socorrida para los estudios económicos, y principalmente para los estudios empíricos; es la variable que paga el agricultor y mejor controla, aunque no es el agua que utiliza realmente el cultivo.

En la figura 1 se presentan las relaciones obtenidas entre los datos experimentales de los rendimientos (tha^{-1}) de mazorcas comerciales, con (figura 1a) y sin (figura 1b) brácteas, de grano fresco comercial (figura 1c) y de producción total de materia seca aérea (figura 1d) frente al agua total (riego + lluvia, mm) recibida por el cultivo de maíz dulce en cada estrategia de programación del riego ensayada (n = 8). Los resultados indican unas relaciones altamente significativas, expresadas mediante modelos matemáticos representados por funciones expopolinómicas de tercer grado, con valores del coeficiente de determinación (R^2) del 97-98% y errores estándares de las estimaciones (llamados también "Root Mean Square of the Error", RMSE) variables entre 38 y 75 $kgha^{-1}$. Mediante la técnica estadística de la regresión no-lineal, BRAUNWORTH y MACK (1987b) presentan modelos matemáticos que relacionan los rendimientos comerciales de mazorcas con el volumen estacional de agua recibida por el cultivo de maíz dulce; las ecuaciones de regresión que mejor se ajustaron a los datos de producción fueron polinómicas de segundo grado, explicando del 87 al 94 % de variación del rendimiento comercial de mazorcas respecto al volumen de agua recibidos por el cultivo durante el ciclo agronómico.

En todas las relaciones obtenidas (figura 1) se observa un valor máximo de las variables estudiadas que se alcanza con volúmenes estacionales de agua recibidos por la parcela comprendidos entre 385 y 410 mm. Por encima de estos valores los rendimientos considerados se reducen, probablemente debido a una deficiente aireación del suelo motivada por una alta frecuencia de riego y/o a un lavado de nutrientes minerales. En el experimento de BRAUNWORTH y MACK (1987b), los máximos rendimientos comerciales de mazorcas con brácteas se obtienen con volúmenes estacionales de agua que oscilaron entre 311 y 428 mm, variables según el diseño y procedimiento experimentales y el año de estudio.

Para saber como afecta a las distintas producciones la cantidad de agua en cada subperíodo del ciclo agronómico, se han realizado las regresiones múltiples de los rendimientos respecto a los mm de agua (riego + lluvia) recibidos por el cultivo en cada una de las etapas en que se ha desglosado el ciclo, según la función lineal:

$$\text{Rendimientos}(tha^{-1}) = aX_1 + bX_2 + cX_3 \quad [2]$$

donde X1, X2 y X3 son los mm de agua recibidos por el maíz dulce desde el estado de 8 hojas hasta la recolección en las tres etapas en que se ha desglosado esta parte del ciclo agronómico (cuadro 3): estado de 8 hojas-80% de cobertura del suelo, 80% de cobertura del suelo-formación de la cosecha y maduración comercial del grano, respectivamente. Los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 7.

Los coeficientes a, b y c de las ecuaciones de ajuste que expresan los rendimientos

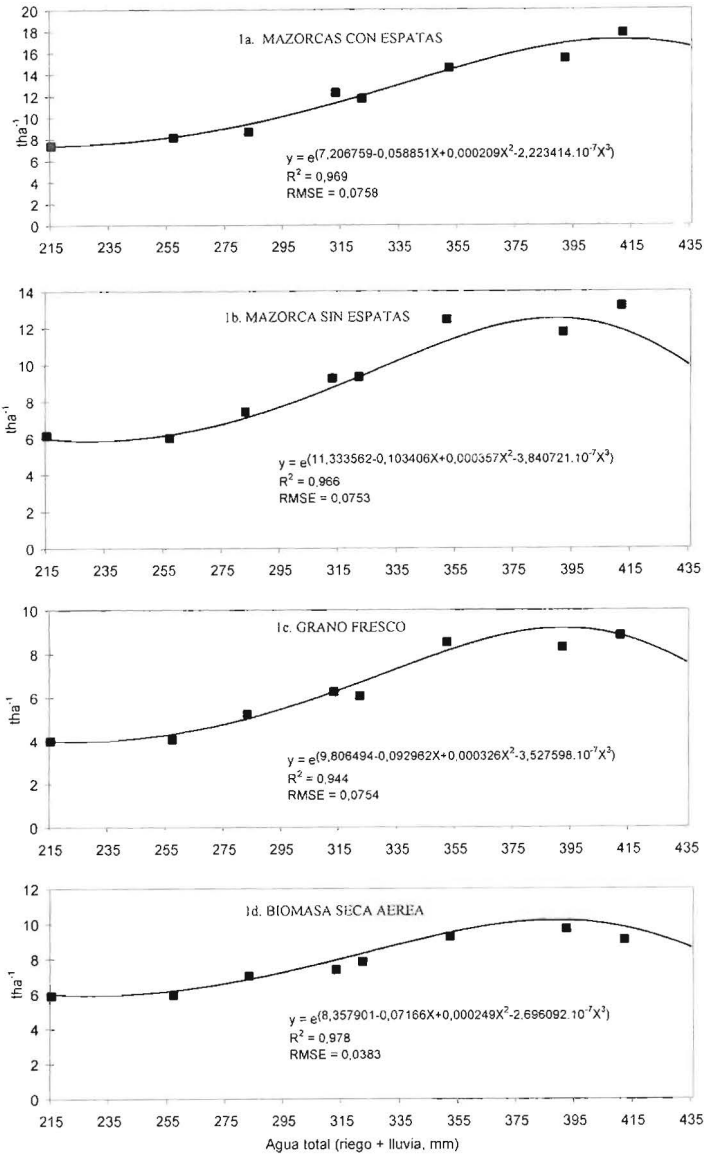


Figura 1. Relaciones entre los rendimientos (tha^{-1}) de mazorcas comerciales, con (a) y sin (b) brácteas, de grano fresco comercial (c) y de producción de materia seca aérea (d) frente al volumen estacional de agua (riego+lluvia, mm) aplicado al cultivo de maíz dulce

Figure 1. Relationships of spathed (a) and unspathed (b) marketable ears, fresh grains (c) and totala aerial dry matter (d) yields versus seasonal water volume (irrigation+rainfall) supplied to sweet corn crop

CUADRO 7
INFLUENCIA DEL AGUA (LLUVIA + RIEGOS) RECIBIDA POR EL CULTIVO DE MAÍZ DULCE EN CADA ETAPA DEL CICLO SOBRE LOS RENDIMIENTOS. ECUACIONES DE AJUSTE
TABLE 7
EFFECT OF WATER (IRRIGATION + RAINFALL) RECEIVED DURING EACH STAGE OF THE GROWING CYCLE ON SWEET CORN YIELD. FITTING EQUATIONS

Rendimientos	Coeficientes[1] tha^{-1}			Coeficientes de determinación (R^2)	Error estándar de la estimación
	a	b	c	%	
Mazorcas con espatas	0,045	0,021	0,110	99,9	0,243
Mazorcas sin espatas	0,041	0,014	0,082	99,6	0,617
Grano fresco tierno	0,032	0,006	0,056	99,7	0,430
Biomasa total seca aérea	0,031	0,036	0,017	98	1,181

(1) a: estado de 8 hojas- 80% de cobertura del suelo; b: 80% de cobertura del suelo-formación de la cosecha; y c: maduración comercial del grano.

de mazorcas, con o sin brácteas, y grano tierno han resultado significativos al 95 %, lo que indica que el agua contribuye consistentemente al incremento de los rendimientos en las tres etapas fundamentales en que se ha desglosado el ciclo agronómico del maíz dulce, aunque el coeficiente b, de menor valor, indica que el agua recibida por el cultivo en la etapa que transcurre entre el 80 % de cobertura del suelo por las plantas y la formación de la cosecha influye menos en el incremento de los rendimientos en mazorcas y bastante poco en el aumento del rendimiento en grano fresco. El agua de riego parece que se aprovecha mejor durante las etapas de encañado y la maduración comercial del grano.

En la figura 2 se presentan las eficiencias de las distintas estrategias de programación del riego, calculadas según la ecuación [1]: IE_{MS}, IE_M e IE_G.

Los valores medios de la IE para la producción de materia seca aérea disminuyen a medida que aumenta el volumen estacional de agua aplicada con el riego, alcanzando el valor más pequeño con el tratamiento hídrico supuestamente más excedentario, IE_{MS}=24,6 $kgha^{-1}$ mm^{-1}. En el caso de la estrategia de programación más deficitaria, por cada mm de agua aplicada mediante la técnica de riego se produce 41,2 $kgha^{-1}$ de biomasa total seca aérea. Esta variación observada en IE_{MS} en los diferentes tratamientos de riego no debe explicarse por diferentes valores de evaporación directa de agua desde el suelo, sino más bien podría ser debida a la mayor frecuencia de riegos en los tratamientos de mayor suministro estacional de agua, pero también a los efectos del estrés hídrico durante el encañado del maíz dulce en los tratamientos deficitarios.

Los valores medios de la IE para los rendimientos en mazorcas comerciales con

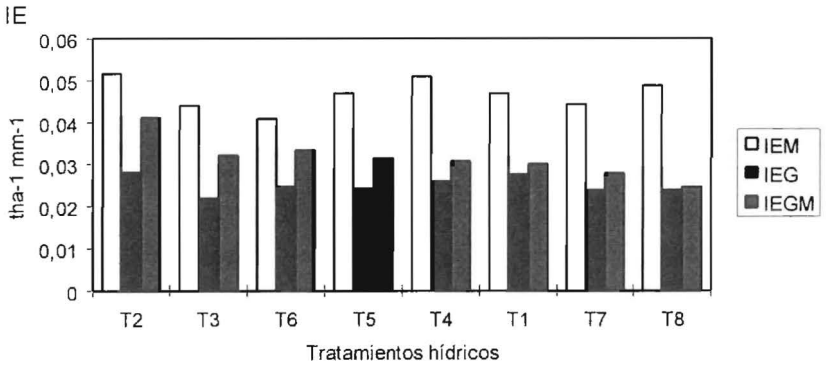


Figura 2. Valores de la eficiencia del agua de riego estacional (IE) referidos a la producción de materia seca aérea (IE_{DM}), al peso de grano fresco (IE_G) y al rendimiento de mazorcas con espatas (IE_M) en los distintos tratamientos aplicados

Figure 2. Seasonal irrigation water efficiencies (IE) related to total aeril dry matter production (IE_{DM}) fresh grain weight (IE_G) and dressed ears yield (IE_M) in different irrigation treatments

brácteas y en grano tierno manifestaron una tendencia muy parecida, alcanzándose los valores máximos de IE_M= 51,7 kgha^{-1} mm^{-1} y IE_G= 28,0 kgha^{-1} mm^{-1} para el tratamiento hídrico T2, valores muy parecidos a los obtenidos por el tratamiento referencia T1. Los tratamientos hídricos supuestamente más excedentarios son los que participan de los inferiores valores de IE_G, 23,8-23,9 kgha^{-1} mm^{-1}. Un déficit controlado en el encañado-floración, formación de la cosecha y la maduración comercial del grano mejora los valores de IE, como lo demuestran los valores obtenidos de IE_M en los tratamientos hídricos T4 y T5: 50,9 y 46,9 kgha^{-1} mm^{-1} respectivamente. ANDREW y WEIS (1974) obtienen valores de IE_M que, dependiendo del año de estudio, oscilaron entre 25,0 y 61,0 kgha^{-1} por cada mm de agua (riego + lluvia) recibida por el cultivo de maíz dulce cuando los suministros de agua fueron deficitarios, y entre 27,0 y 49,0 kgha^{-1} mm^{-1} con los mayores volúmenes estacionales de agua.

Conclusiones

La densidad poblacional obtenida al final de este ensayo se ha visto afectada por el sistema de riego por aspersión, elegido para favorecer la nascencia, en un suelo estructuralmente inestable y con tendencia al encostramiento, junto con la falta de vigor que caracteriza a las semillas de esta especie.

Con respecto al rendimiento cuantitativo, puede afirmarse que la producción total de materia seca aérea y los rendimientos en mazorcas comerciales y en grano tierno se vieron muy afectados por el déficit hídrico, y en mayor grado cuando éste fue más

intenso y continuado a lo largo del ciclo de cultivo de maíz dulce. La mayor caída del rendimiento se produjo en la producción de mazorcas comerciales con brácteas (58,86%), seguida de las caídas de la producción de mazorcas comerciales sin espatas, de grano tierno y de biomasa total seca: 54,73, 54,50 y 39,30 %, respectivamente.

El estrés hídrico produjo una fuerte reducción del número de mazorcas comerciales por hectárea y del peso medio unitario de ellas, que llegó a ser del orden de 27,23% y 43,56% para estos dos componentes del rendimiento, respectivamente, en el tratamiento más estresado con respecto al no restringido.

El índice de cosecha también fue muy afectado por los tratamientos diferenciales de riego. En el tratamiento más deficitario de estrés hídrico más intenso y prolongado, el índice de cosecha fue el 74,26% del tratamiento hídrico supuestamente más excedentario.

Con respecto a los parámetros de calidad, el riego disminuye el contenido de sólidos solubles (°Brix) del grano tierno, alarga ligeramente el ciclo de maduración comercial del mismo y mejora claramente las dimensiones de las mazorcas comerciales frescas.

Las relaciones entre la producción de materia seca total aérea y de los rendimientos en mazorcas comerciales, con y sin brácteas, y en grano fresco frente al agua recibida por las parcelas (riego + lluvia) para el cultivo del maíz dulce fueron de tipo expopolinómica de tercer grado, con altos valores del coeficiente de determinación (R^2: 97-98%) y errores estándares de las estimaciones variables entre 38 y 75 $kgha^{-1}$. En todas las relaciones establecidas se ha detectado un valor máximo de las variables de producción estudiadas, que corresponde a volúmenes estacionales de agua recibidos por el cultivo comprendidos entre 385 y 410 mm, lo que confirma al maíz dulce como una buena alternativa para los regadíos de la provincia de Albacete, y en otras zonas con disponibilidades limitadas de agua de riego.

El agua de riego parece ser que se aprovecha mejor durante las etapas de encañado y la maduración comercial del grano del ciclo de cultivo de maíz dulce.

La alta frecuencia del riego y una posible pérdida de nutrientes por lavado podría explicar los reducidos valores de las distintas IE calculadas para los tratamientos más excedentarios (T7 y T8), con valores de IE_M= 0,044-0,049 tha^{-1} mm^{-1}, de IE_G= 0,0238-0,0239 tha^{-1} mm^{-1} y IE_{MS}= 0,0246-0,0278 tha^{-1} mm^{-1}. El tratamiento hídrico más deficitario, de estrés hídrico más intenso y prolongado (T2), fue el que ofreció los valores máximos de IE: IE_M= 0,0517 $tha^{-1}mm^{-1}$, IE_G= 0,0280 $tha^{-1}mm^{-1}$ y IE_{MS}= 0,042 $tha^{-1}mm^{-1}$.

Agradecimientos

Al Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP, S.A) de Albacete por la concesión de una subvención para la realización de la presente investigación.

A Pedro Gómez Picazo por su inestimable ayuda en las tareas de campo y laboratorio.

Bibliografía

ANDREW R.H., WEIS G.G., 1974. Variation in effectiveness of supplemental irrigation on sweet corn yield components. Agron. J. 66. 345-350.

BAKER J.M., 1990. Measurement of soil water content.Remote Sensing Rev. 51. 263-279.

BIANCHI A., 1969. Le maïs comme culture horticole: le maïs sucre. Sementi elette 15. 220-229.

BRAUNWORTH W.S., MACK H.J. 1987a. Evaluation of irrigation scheduling methods for sweet corn. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 112. 29-32.

BRAUNWORTH W.S., MACK H.J., 1987b. Effect of deficit irrigation on yield and quality of sweet corn. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 112. 32-35.

CALDWELL D.S., SPURGEON W.E., MANGES H.L., 1994. Frecuency of irrigation for subsurface drip-irrigated corn. Trans. ASAE 37. 1099-1103.

CAMP C.R., SADLER E.J., BUSSCHER W.J., 1989. Subsurface and alternate-middle microirrigation for the southeastern Coastal Plain. Trans. ASAE 32. 451-456.

CAMP C.R., GARRETT J.T., SADLER E.J., BUSSCHER W.J., 1993. Microirrigation management four double-cropped vegetables in humid area. Trans. ASAE 36. 1639-1644.

CANTLIFFE D.J., WOLF E.A., WHITE J.M., 1975. Improved germination and plant of ' Florida sweet' corn by seed treatment. Proc. Fla. State Hort. Soc. 88. 170-173.

CAROLUS R.L., SCHLEUSENER P.E., 1950. Effect of irrigation on yield of snap beans sweet corn. and tomatoes as influenced by certain cultural practices in 1949. Michigan Agr. Expt. Sta. Quart. Bul. 32. 465-478.

DAYNARD T.B., TANNER J.W., HUME D.J., 1969. Contribution of stalk soluble carbohydrates to grain yield in corn (Zea mays L.). Crop Sci. 9. 831-834.

DE JUAN J.A., MARTÍN DE SANTA OLALLA F.J., 1993. Las funciones de producción versus agua. En: Agronomía del riego . 447-547. Mundi-Prensa. S.A. Universidad de Castilla-La Mancha. Madrid. España.

DELACROIX J.P., 1974. Le maïs doux et l´avenir de sa commercialisation. Monographie de L´Institut Supérieur d´Agriculture. L´Ille. Paris. France.

DERIEUX M., DARRIGRAND M., GALLAIS A., BARRIÈRE Y., BLOC D., MONTALANT V., 1987. Estimation du progrés génétique chez le maïs grain en France entre 1950 et 1985. Agromomie 7. 1-11.

DEUMIER J.M., LACROIX B., BOUTHIER A., 1981. Alimentation en eau du maïs en période préfloraison et élaboration du rendement en grain. In: Physiologie et production du maïs. 359-366. AGPM-INRA. Paris. France.

DOORENBOS J., KASSAMA H., 1986. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO. Riego y Drenaje nº 33. FAO. Roma. Italia.

DOORENBOS J., PRUITT W.O., 1977. Crop Water Requeriments. Irrigation and Drainage Paper 24. FAO. Rome. Italy.

EVANS D.A., MACK H.J., STEVENSON D.S., WOLFE J.W., 1960. Soil moisture. nitrogen. and stand density effects on growth and yield of sweet corn. Oregon Agr. Expt. Sta. Tech. Bul. 53.

FLEURY A., 1991. L´élaboration du rendement. outil de diagnostic sur l´effet des techniques. In: Physilogie et production du maïs. 277-290. AGPM-INRA. Paris. France.

GARRITY D.P., WATTS D.G., SULLIVAN C.Y., GILLEY I.R., 1982. Moisture deficits and grain sorghum performance: Evapotranspiration-yield relationships. Agron. J. 74. 815-820.

GUPTA S.C., LARSON W.E., 1989. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution. organic matter content. and bulk density. Water Resour. Res. 15. 1633-1635.

HOWELL J.A., CUENCA R.H., SALOMON K.H., 1990. Crop yield response. In: G.F. Hoffman. T.A. Howell. K.H. Salomon (eds). Management of Farm Irrigations Systems.93-112. St. Joseph. MI. USA.

HUET S., JOLIVET E., MESSEAN A., 1992. La régresion non-linéaire. INRA Editions. Paris. France.

HUME D.J., CAMPBELL D.K., 1972. Accumulation and translocation of soluble solids in corn stalks. Can J. Plant Sci. 52. 362-368.

INGLETT G.E., 1970. Corn. culture. processing. The Avi Publishing Co. Inc. Wesport. Connecticut. USA.

ITCF., 1989. STAT-ITCF. Institut Technique des Ceréales et des Fourrages. Paris. France.

JONES R.J., SIMMONS S.R., 1983. Effect of altered source-sink ratio on growth of maize kernels. Crop Sci. 23. 129-134.

JURGENS S.K., JOHNSON R.R., BOYER J.S., 1978. Dry matter production and translocation in maize subjected to drought during grain nill. Agron. J. 70. 678-682.

LAMM F.R., MANGES H.L., STONE L.R., KHAN A.H., ROGERS D.H., 1995. Water requeriment of drip-irrigated corn in Northwest Kansas. Trans. ASAE 38. 441-448.

LAMM F.R., ROGERS D.H., MANGES H.L., 1994. Irrigation scheduling with planned soil water depletion. Trans. ASAE 37. 1491-1497.

LOGEOU J., GOYTINO B., 1991 Densité de culture et distance entre rangs: conséquences en matiére de preconisation sur les estructures de peuplement. In: Physiologie et production du maïs. 345-366. AGPM- INRA. Pau-Paris. France.

MACGILLIVRAY J.H., 1949. Effect of irrigation on the growth and yield of sweet corn. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 54. 330-338.

MACKAY D.C., EAVES C.A., 1962. The influence of irrigation treatments on yields and on fertilizer utilization by sweet corn and snap beans. Can. J. Plant Sci. 42. 219-228.

MANTOVANI E.C., 1993. Desarrollo y evaluación de modelos para el manejo del riego: estimación de la evapotranspiración y efectos de la uniformidad de aplicación de riego sobre producción de los cultivos. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba.

MAROTO J.V., ALARGADA J., BONO M.S., LÓPEZ-GALARZA S., PASCUAL B., 1991. Efectos de la aplicación de un antitranspirante (Pinolene) en la incidencia de mazorcas con las puntas desecadas en el cultivo de maíz dulce (Zea mays L. var. Rugosa Bonaf). Primeros resultados. Agrícola Vergel / junio. 407-410.

MARTÍN DE SANTA OLALLA F.J., DE JUAN J.A., 1993. La programación de riegos. In: F.J. Martín de Santa Olalla y J.A de Juan (coords.). Agronomía del Riego. 551-610. Ed. Mundi-Prensa. S.A. Universidad de Castilla-La Mancha. Madrid. España.

MILLER D.E., BURKE D.W., 1983. Response of dry beans to dailey deficit sprinkler irrigation. Agron. J. 75. 775-778.

MILLER S.F., BOERSMA L.L., 1966. Economic analysis of water, nitrogen, and seeding rate relationships in corn production on woodburn soils. Or. Agr. Expt. Sta. Tech. Bul. 98.

MOLINA E., 1990. Maíz dulce (Zea mays var. rugosa). Agrícola Vergel. abril. 338-341.

MOSLEY A.R., 1973. Responses of sweet corn to plant population and planting arrangements. Outdoor Vegetable Crops Res. 1. 49-50.

PARERA C.A., CANTLIFFE D.J., 1994. Presowing seed treatments to enhance supersweet corn seed and seedding quality. HortScience 29. 277-278.

PEIRCE L.C., 1987. Sweet corn. In: Vegetables. Characteristics. Production. and Marketing. 383-397. John Wiley and Sons. Inc. New York. NY. USA.

PETERSEN K.L., MACK H.J., CUENCA R.H., 1985. Effect of tillage on the crop-water production function of sweet corn in Western Oregon. HortScience 20. 901-903.

PETERSON H.B., BALLARD J.C., 1953. Effect of fertilizer and moisture on the growth and yield of sweet corn. Utah Agr. Expt. Stat. Bul. 360.

QUATTAR S., JONES R.J., CROOKSTON R.K., KAJEIOU M., 1987. L´adaptation du grain de maïs (Zea mays L.) a la secheresse pendant la phase reproductive. In: Le maïs et l´eau. 1-18. Colloque Alimentation Hydrique du maïs. Agen. 8 et 9 Décembre 1987. AGPM-ITCF. Agen. France.

RAWLS W.L., BRANKENSIER D.L., SAXTON K.E., 1982. Estimation of soil water properties. Trans.ASAE 25. 1316-1320.

RIBAS F., MORENO M., CABELLO M.J., MORENO A., 1998. Influencia del riego y del abonado potásico en el contenido de azúcar del melón en Ciudad Real. XVI Congreso Nacional de Riegos. Palma de Mallorca. Baleares. España.

RICHARDS L.A., 1941. A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. Soil Sci. 51. 377-386.

RODRIGO M., VAYA J., LORENZO P., NAVARRO A., SAFON J., PUIG M., 1984. Maíz dulce para conservas: variedades. cultivo e industrialización. Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos (C.S.I.C). Valencia. España.

SAFONTAS J.E., DI PAOLA. J.C., 1985. Drip irrigation of maize. In: Drip/Trickle Irrigation to Action. Proc. of the Third Int. Drip/Trickle Irrigation Congress. Fresno. USA.

SAN MARTÍN C., MACUA J.F., SAN AGUSTÍN J.L., SAEZ C.I., 1994. Influencia de la dosis de riego sobre la producción y la calidad del tomate para la industria

para concentrado. XII Jornadas Técnicas sobre Riegos. Santa Cruz de Tenerife. Tenerife. España.

SAS Institute. 1995. ANOVA. In: SAS Users Guide: Statistics. 113-138. SAS Institute Inc. Cary. NC. USA.

STANBERRY C.O., SCHREIBER H.A., LOWREY M., JENSON C.L., 1963. Sweet corn production as affected by moisture and nitrogen variables. Agron. J. 55. 159-161.

STEEL R.G.A., TORRIE J.H., 1985. Bioestadística. Principios y procedimientos. 2ª Edición y primera en castellano. Mc Graw-Hill. México D.F. México.

STEGMAN E.C., 1982. Corn grain yield as influenced by timing of evapotranspiration deficits. Irr. Sci. 3. 75-87.

STEGMAN E.C., 1983. Irrigation scheduling: Applied timing criteria. In: D. Hillel (ed.) Advances in Irrigation. Vol. 2. 1-30. Academic Press. New York. NY. USA.

STEGMAN E.C., 1986. Efficient irrigation timing methods for corn production. Trans. ASAE 29. 203-210.

STEWART J.I., HAGAN R.M., 1973. Functions to predict effects of crop water deficits. J. Irrig. Drain. Div. ASCE 99. 421-439.

STEAWART J.I., HAGAN R.M., PRUITT W.O., DANIELSON R.E., FRANKLIN W.F., HANKS R.J., RILEY J.P., JACKSON E.B., 1977. Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. PRWG 151-1. September. 1977. Utah. Water Research Laboratory. College of Engineering. Utah State University. Logan. Utah. USA.

VAN LOON W.K.P., PERFECT E., GROENEVELT P.H., KAY B.D., 1990. A new method to measure bulk electrical conductivity in soils with time domain reflectometry. Can. J. Soil Sci. 70. 403-410.

VAUX H.J., PRUITT W.O., HATCHETT S.A., DESOUZA F., 1981. Optimization of water use with respect to crop production. Tech. Completion Rep. California Dep. Water Resour. Agreement B-53395. Davis. CA. USA.

VAUX H.J., PRUITT W.O., 1983 Crop-water production functions. In: D. Hillel (ed) Advances Irrigation. Vol.2. 61-97. Academic Press. N.Y. USA.

VITTUM M.T., PECK N.H., CARRUTH A.F., 1959. Response of sweet corn to irrigation. fertility level and spacing. New York State Agr. Expt. Stat. Bul. 786.

WADE W.H., ALSTRAND D.V., BENJAMIN H.A., JACKSON J.M., 1950. Influence of packing conditions on the process requeriments of vacuum packed whole kernel corn. Food Technol. 4. 129-132.

WATTS D.G., DEHLINGER C.R., WOLFE J.W., SHEARER M.N., 1968. Consumptive use and net irrigation requeriments for Oregon. Oregon Agr. Expt. Sta. Cir. Inf. 628.

WEI L.S., STEINBERG M.P., NELSON A.I., 1967. Quality of sweet corn during maturation as determined by two rapide objetive methods. Food Technol. 21. 106-108.

(Aceptado para publicación el 1 de septiembre de 1999)