



UNIVERSITAT DE LLEIDA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
D'ENGINYERIA AGRÀRIA

**RESPUESTA DEL MAÍZ (*Zea mays* L.) Y SORGO
(*Sorghum bicolor* L. Moench) AL RIEGO
DEFICITARIO. AGRONOMÍA Y MODELIZACIÓN**



**MAIZE (*Zea mays* L.) AND SORGHUM (*Sorghum
bicolor* L. Moench) RESPONSE TO DEFICIT
IRRIGATION. AGRONOMY AND MODELLING**

IMMACULADA FARRÉ CODINA

CAPÍTULO 3

**RESPUESTA DEL MAÍZ AL RIEGO
DEFICITARIO POR INUNDACIÓN EN
DISTINTAS FASES DE SU DESARROLLO**

CAPÍTULO 3

RESPUESTA DEL MAÍZ AL RIEGO DEFICITARIO POR INUNDACIÓN EN DISTINTAS FASES DE SU DESARROLLO

Resumen

El estudio de la respuesta de los cultivos al riego deficitario es necesario para optimizar el uso del agua en aquellas regiones donde el agua es un recurso escaso. Se realizaron dos ensayos de campo en un suelo franco (*Typic Xerofluvent*) para determinar la respuesta productiva de un cultivo de maíz a distintos tratamientos de riego deficitario por inundación. El ciclo de cultivo se dividió en tres fases: vegetativa, floración y llenado del grano. Los tratamientos de riego incluyeron todas las combinaciones de riego completo y riego deficitario (30% del riego completo) en las distintas fases. Se midió el contenido de agua en el suelo, parámetros de crecimiento (área foliar, altura de planta, fracción de PAR interceptado), materia seca aérea, rendimiento en grano y sus componentes. La fase de floración fue la más sensible al riego deficitario con reducciones de materia seca aérea, rendimiento e índice de cosecha. El rendimiento en grano en los tratamientos con riego deficitario en la fase de floración (691 g m^{-2}) fue significativamente menor que en los tratamientos de riego completo en esa fase (1069 g m^{-2}). El descenso de rendimiento del maíz fue debido fundamentalmente a un menor número de granos por metro cuadrado. En los tratamientos sometidos a riego deficitario en la fase de llenado del grano, el crecimiento y el rendimiento en grano no se vieron significativamente afectados.

Abstract

Research on crop response to deficit irrigation is necessary to improve irrigation management in areas where water is a limited resource. Two field experiments were conducted on a loam soil (*Typic Xerofluvent*) to obtain the response of a maize crop under different flood irrigation treatments. The growing season was divided into three phases: vegetative, flowering and grain filling. The irrigation treatments consisted of all possible combinations of full irrigation or limited irrigation (30% of full irrigation) in the three phases. Soil water status, crop growth, above-ground biomass, yield and its components were measured. Flowering was the most sensitive stage to water deficit with reduction in biomass, yield and harvest index. Grain yield of treatments with deficit irrigation during flowering (691 g m^{-2}) was significantly lower than that of the well irrigated treatments (1069 g m^{-2}). Yield reduction was mainly due to a lower number of grains per square meter. Deficit irrigation during the grain filling phase did not affect significantly crop growth and yield.

Palabras clave: Maíz, riego deficitario, fases de desarrollo, rendimiento.

1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es un cultivo muy extendido en los regadíos del Valle del Ebro, donde ocupa el 18,6% de la superficie en regadío. Tiene un alto potencial productivo, alcanzándose rendimientos de hasta 10-12 t ha⁻¹, bajo condiciones no limitantes de agua de riego.

Pese a la creciente introducción de sistemas de riego a presión, el riego por superficie es la práctica predominante en la mayoría de los regadíos de la zona. La práctica habitual en los sistemas de riego por superficie consiste en riego por turnos ("ador"), con espaciamiento entre riegos de entre 10 y 20 días. Sin embargo, en años secos en los que hay limitaciones de agua, se produce un aumento del intervalo entre riegos, que conlleva un mayor agotamiento del agua del suelo que llega a ocasionar estrés hídrico en los cultivos e importantes descensos productivos, especialmente en cultivos sensibles como el maíz. Esta alta sensibilidad hace difícil el manejo del agua de riego en condiciones limitantes sin incurrir en importantes descensos de rendimiento (Rhoads y Bennet, 1990; Lamm *et al.*, 1994).

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) se ha presentado como un interesante cultivo alternativo al maíz en condiciones de agua de riego limitante (Muchow, 1989; Berenguer, 1996; Capítulo 2). Sin embargo, en la actualidad el maíz es un cultivo muy extendido en la zona y es de gran interés la profundización en el conocimiento de la respuesta productiva de este cultivo al déficit hídrico.

El estrés hídrico en los cultivos es un proceso dinámico y sus efectos en el crecimiento y rendimiento dependen de la intensidad, duración y momento en que éste se produce durante el desarrollo del cultivo (Hsiao *et al.*, 1976). Por ello, el conocimiento de la respuesta de los cultivos al déficit hídrico producido en momentos concretos de su ciclo de cultivo y con frecuencias y dosis de riego similares a las que se dan localmente es de gran utilidad para el establecimiento de estrategias óptimas de riego en condiciones limitantes de agua de riego.

Los efectos de un estrés hídrico severo, producido por la suspensión total del riego en alguna de las fases del cultivo del maíz, han sido ampliamente estudiados (Robins y Domingo, 1953; Denmead y Shaw, 1960; Stegman, 1982;

Scheierling *et al.*, 1997). Los resultados de estos trabajos confirman la idea generalizada de que la fase de floración es la más sensible al estrés hídrico (NeSmith y Ritchie, 1992a; NeSmith y Ritchie, 1992b; Otegui *et al.*, 1995), siendo los déficits hídricos producidos en las fases vegetativa y de llenado del grano menos perjudiciales en el rendimiento final (Doorenbos y Kassam, 1979). Sin embargo, los efectos sobre el rendimiento, sus componentes y la eficiencia en el uso del agua de un déficit hídrico moderado, producido por un mayor espaciamiento entre riegos, han sido menos estudiados en la zona.

Por otro lado, el empleo de tuberías provistas de pequeñas compuertas deslizantes (empleadas normalmente en el riego por surcos) resulta muy interesante para la realización de ensayos de riego por inundación con un número elevado de tratamientos, en un espacio relativamente pequeño y con un diseño experimental adecuado. Estas tuberías permiten regar individualmente pequeñas parcelas delimitadas por caballones, obtener frecuencias y dosis de riego similares a los que se dan localmente y reproducir las mismas condiciones de agotamiento de la humedad del suelo que se dan en la realidad.

En este trabajo se presentan los resultados de dos ensayos de campo utilizando tuberías con compuertas y riego por inundación, para el estudio de la respuesta productiva del maíz a un déficit hídrico moderado en distintas fases de su desarrollo.

Los objetivos de este trabajo han sido:

1. estudiar el efecto de un déficit hídrico moderado en distintas fases del ciclo del cultivo del maíz sobre el crecimiento, el rendimiento y sus componentes.
2. obtener información adicional respecto a la adopción de estrategias de riego deficitario por inundación en maíz en una región de alta demanda evaporativa.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Se realizaron dos ensayos en una parcela de la finca experimental del Servicio de Investigación Agroalimentaria (S.I.A.) de Zaragoza, noreste de España (latitud 41° 43' N, longitud 0° 49' W, altitud 225 m) en los años 1995 y 1996.

2.1. Suelo y clima

El suelo de la parcela, desarrollado a partir de depósitos aluviales del río Gállego, se clasifica a nivel de familia como *Typic Xerofluvent*, franco gruesa, mezclada (calcárea), méstica (SSS,1992). La Tabla 3.1 presenta las principales propiedades físico-químicas del suelo. La textura del horizonte superficial es franca y la de los horizontes subsuperficiales varía de franca-arenosa (Far) a franca (F), encontrándose muy pocos o ningún elemento grueso. El suelo está limitado en profundidad por gravas poligénicas que aparecen en general entre 110 y 170 cm. El contenido de humedad volumétrico a capacidad de campo (-0,03 MPa) y punto de marchitez permanente (-1,5 MPa) se midieron en capas de 30 cm hasta 120 cm de profundidad mediante placas de presión (Richards, 1949). El contenido de humedad volumétrico promediado para las distintas capas es de 27,4 % a capacidad de campo y 8,8 % a punto de marchitez permanente. El valor de densidad aparente (da) del suelo varía entre 1,32 g cm⁻³ en superficie y 1,41 g cm⁻³ en profundidad.

Tabla 3.1. Propiedades físico-químicas del suelo de la parcela experimental.

Horizonte (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase Textural	da (g cm ⁻³)	*C.C. vol. (%)	*P.M.P. vol. (%)
0-30	43,3	40,1	16,6	F	1,32	26,7	10,3
30-60	62,3	26,4	11,3	Far	1,38	27,5	9,1
60-90	57,0	30,6	12,4	Far	1,38	27,1	8,0
90-120	51,8	34,6	13,6	F	1,41	28,3	7,8

Horizonte (cm)	PH	CE _{1,5} (dS m ⁻¹)	MO (%)	P Olsen (ppm)	K (ppm)	Carbonato cálcio equivalente	Caliza activa (%)
0-30	8,3	0,33	1,57	5,0	36,9	36,5	5,3
30-60	8,3	0,24	0,80	2,5	17,4	37,1	3,9
60-90	8,4	0,18	0,69	0,9	15,6	37,8	4,8
90-120	8,5	0,18	0,72	0,6	10,0	37,3	5,3

* Los contenidos volumétricos de humedad a capacidad de campo (C.C.) y punto de marchitez permanente (P.M.P) corresponden al promedio de 100 muestras de suelo tomadas en 1996. El resto de valores corresponden al promedio de 4 muestras de suelo tomadas en la primavera de 1995.

En la Fig.3.1 se presentan los valores diarios de temperatura media y radiación solar y la precipitación mensual desde mayo a septiembre de 1995 y 1996, registrados en una estación agroclimática automatizada situada en la misma finca experimental. El régimen de temperatura y de radiación solar fue relativamente similar en el periodo de mayo a septiembre en los dos años. El promedio de temperaturas medias diarias fue de 21,0 °C en 1995 y de 20,3 °C en 1996. La radiación solar media fue de 22,2 MJ m² d⁻¹ en 1995 y de 22,7 MJ m² d⁻¹ en 1996. En este periodo la temperatura media varió de 11,9 a 29,6 °C en 1995 y de 10,7 a 28,7 °C en 1996 y la radiación solar de 7,2 a 30,4 MJ m² d⁻¹ en 1995 y de 4,5 a 30,5 MJ m² d⁻¹ en 1996.

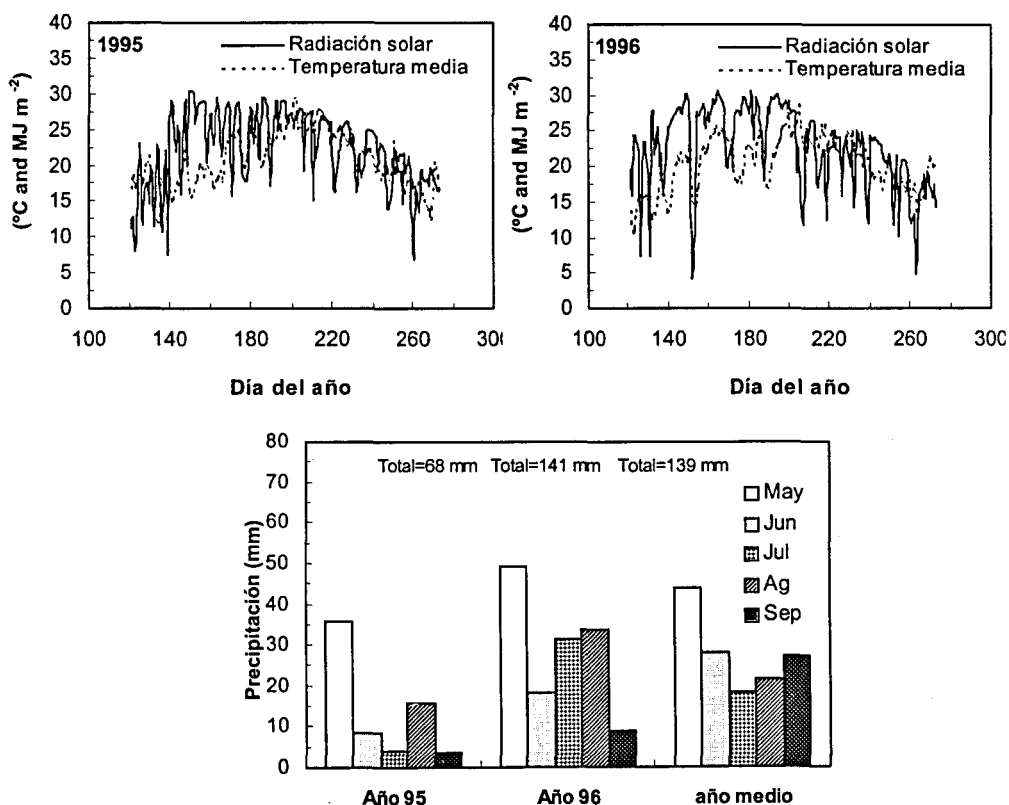


Fig. 3.1. Valores diarios de temperatura media y radiación solar de mayo a septiembre en 1995 y 1996. Distribución mensual de las precipitaciones de mayo a septiembre en 1995, 1996 y en el año medio.

La precipitación total de mayo a septiembre fue de 68 mm en 1995 y 141 mm en 1996. La precipitación acumulada desde la siembra del maíz a su madurez fisiológica fue de 38 mm y 103 mm en 1995 y 1996 respectivamente. La evapotranspiración de referencia (ET_0) desde siembra a madurez fisiológica estimada mediante el método Penman-Monteith (Jensen *et al.*, 1990) fue de 694,5 mm y 683,9 mm en 1995 y 1996 respectivamente.

2.2. Prácticas culturales

En el año 1995, previamente a las labores de preparación de la parcela, ésta se niveló a pendiente cero con nivelación guiada con rayo láser. El maíz (cv. Prisma ciclo 700) se sembró el 17 de mayo en 1995 y el 16 de mayo en 1996, en líneas orientadas N-S y a 75 cm de separación entre líneas. La fecha de siembra se refirió como 0 días después de siembra (DDS). La población final fue de 8,2 pl m² y 8,0 pl m² en 1995 y 1996 respectivamente. En ambos años el P y K se aportaron en una única aplicación en fondo anterior a la siembra, mientras que el N se fraccionó en una aplicación en fondo y dos coberteras. La fertilización (350, 150, y 150 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O) se realizó en base al análisis del suelo y a la producción de materia seca esperada, de forma que el cultivo no tuviese limitaciones nutricionales. Malas hierbas, plagas y enfermedades se controlaron según las prácticas habituales en la zona.

2.3. Tratamientos de riego deficitario

Los resultados de ensayos de riego deficitario en distintas fases son de difícil comparación. Ello se debe al establecimiento arbitrario del inicio y fin de las fases y a la distinta duración de fases que se denominan igual en distintos trabajos. Otra limitación en la comparación de trabajos es la de establecer si el tratamiento deficitario se inicia en el momento en que se suspende el riego o en el momento en que el cultivo acusa déficit hídrico debido a la suspensión previa del riego. El agua almacenada en el suelo juega un papel relevante cuando se pretende crear un déficit hídrico en el cultivo eliminando el riego.

En este trabajo, para el establecimiento de los tratamientos de riego, el ciclo de cultivo se dividió en tres fases, que se denominaron: Fase I o vegetativa, Fase II

o de floración, Fase III o de llenado de grano. En la Tabla 3.2 se presentan la duración en días y la evapotranspiración (ET) del maíz correspondiente a cada una de estas fases. Las fases I, II y III tuvieron una duración aproximada de 60, 30 y 50 días respectivamente en ambos años.

Tabla 3.2. Fases en las que se dividió el ciclo de cultivo del maíz. Fechas de inicio y fin, duración en días y ET del maíz (ETc) de cada una de las fases.

Año	Fase	Fecha (Día del año)				Duración (días)	ETc (mm)
		Inicio		Fin			
1995	I Vegetativa	Siembra	(137)	17-7	(198)	62	228,3
	II Floración	18-7	(199)	18-8	(230)	32	203,8
	III Llenado grano	19-8	(231)	Madurez	(278)	48	191,0
1996	I Vegetativa	Siembra	(137)	18-7	(200)	64	252,7
	II Floración	19-7	(201)	15-8	(228)	28	150,4
	III Llenado grano	16-8	(229)	Madurez	(279)	51	199,5

Los tratamientos de riego se establecieron aplicando las cantidades de agua de riego necesarias para cubrir las necesidades hídricas de cultivo (R) o bien un tercio de esas cantidades (s) en cada una de las tres fases. Se aplicaron todas las combinaciones posibles de "R" y "s" en las tres fases del ciclo de cultivo (RRR, RRs, RsR, sRR, Rss, ssR, sRs, sss). A estos tratamientos se les añadió un tratamiento intermedio (rrr), que recibió el 50% del agua de riego del tratamiento RRR. En el año 1995 el tratamiento RRs fue sustituido por una variante del tratamiento RsR, denominado Rs'R, que consistió en aplicar un tercio de las necesidades hídricas en la fase II, pero en momento distinto que la de RsR (Tabla 3.3).

El calendario de riegos en el tratamiento más regado o control (RRR) se estableció de forma que el intervalo entre riegos fuera similar a las prácticas habituales en la zona. Este calendario de riegos se basó en la ET del maíz (ETc), que se estimó a partir de la evapotranspiración de referencia (ET₀) del año medio (Faci *et al.*, 1994) y los coeficientes de cultivo (Kc) de la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977) adaptados a las condiciones de cultivo de la comarca de Zaragoza (Martínez-

Cob *et al.*, 1998). En cada riego, las dosis así establecidas se ajustaron (aumentando o disminuyendo las cantidades preestablecidas) usando los valores reales de ET_0 obtenidos en un lisímetro de pesada situado en la misma finca experimental.

La Tabla 3.3 presenta las fechas y láminas de agua aplicadas en cada riego en los distintos tratamientos en 1995 y 1996.

Tabla 3.3. Fechas de riego (días después de siembra, DDS) y cantidades de agua de riego aplicada (mm) en los distintos riegos. Cantidad total de agua aplicada en riego (Total R), cantidad estacional de riego más lluvia (R + LI) y número de riegos en los distintos tratamientos en 1995 y 1996.

1995	Fase I			Fase II			Fase III			Total R (mm)	R+ LI (mm)	N° riegos
	Fecha	14-6	26-6	7-7	18-7	28-7	9-8	22-8	5-9			
DDS	28	40	51	62	72	84	97	111	125			
RRR	79,3	65,2	60,7	60,2	65,0	65,0	60,0	57,4	55,6	568,4	606,4	9
Rs'R*	79,3	65,2	60,7	60,2			60,0	57,4	55,6	438,4	476,4	7
RsR	79,3	65,2	60,7		52,0		60,0	57,4	55,6	430,2	468,2	7
sRR		65,2		60,2	65,0	65,0	60,0	57,4	55,6	428,4	466,4	7
Rss	79,3	65,2	60,7		52,0			57,4		314,6	352,6	5
ssR		65,2			52,0		60,0	57,4	55,6	290,2	328,2	5
sRs		65,2		60,2	65,0	65,0		57,4		312,8	350,8	5
sss		65,2			52,0			57,4		174,6	212,6	3
rrr	79,3		60,7		65,0		60,0		55,6	320,6	358,6	5

1996	Fase I			Fase II		Fase III			Total R (mm)	R+ LI (mm)	N° riegos
	Fecha	7-6	28-6	10-7	22-7	5-8	16-8	30-8			
DDS	22	43	55	67	81	92	106	120			
RRR	63,3	58,4	69,7	70,7	66,0	55,2	59,7	62,4	505,3	608,3	8
RRs	63,3	58,4	69,7	70,7	66,0		59,7		387,8	490,8	6
RsR	63,3	58,4	69,7		32,0	55,2	59,7	62,4	400,6	503,6	7
sRR		58,4		70,7	66,0	55,2	59,7	62,4	372,2	475,2	6
Rss	63,3	58,4	69,7		32,0		59,7		283,1	386,1	5
ssR		58,4			32,0	55,2	59,7	62,4	267,5	370,5	5
sRs		58,4		70,7	66,0		59,7		254,7	357,7	4
sss		58,4			32,0		59,7		150,0	253,0	3
rrr	63,3		69,7		66,0		59,7		258,7	361,7	4

* En 1995 hubo dos tratamientos con riego deficitario en la fase II: el tratamiento RsR recibió un riego hacia la mitad de la fase II mientras que el tratamiento Rs'R recibió un riego al inicio de la fase II.

El tratamiento RRR recibió un total de 9 riegos en 1995 y 8 riegos en 1996, con un intervalo medio entre riegos de 12 días en 1995 y de 14 días en 1996. En este tratamiento se aplicaron 3 riegos por fase, excepto en la fase II del año 1996 en que se aplicaron dos riegos debido a la elevada cantidad de lluvia registrada en este período (48 mm).

El riego deficitario (s) en una determinada fase consistió en la aplicación de un único riego (el central) de los tres del tratamiento RRR en dicha fase, lo que en la práctica suponía un mayor intervalo entre riegos. Los tratamientos de riego deficitario recibieron entre 3 y 7 riegos (Tabla 3.3). El tratamiento rrr recibió un total de 5 y 4 riegos en 1995 y 1996 respectivamente, con un intervalo medio entre riegos de 24 y 28 días durante toda la estación en 1995 y 1996.

La cantidad total de agua recibida por los tratamientos con riego deficitario en una sola de las fases (Rs'R, RsR, sRR en 1995 y RRs, RsR, sRR en 1996) fue del 78 % y del 81 % de la cantidad recibida por el tratamiento RRR en 1995 y 1996 respectivamente. Los tratamientos con riego deficitario en dos de las fases (Rss, ssR, sRs) y el tratamiento rrr recibieron el 57 % en 1995 y el 61% en 1996 de la cantidad de agua aplicada en el tratamiento RRR. El tratamiento deficitario en las tres fases (sss) recibió el 35% en 1995 y el 42% en 1996.

La Fig. 3.2 presenta la ETc acumulada del maíz y el agua aplicada acumulada (riego + lluvia) en el tratamiento RRR durante las estaciones de cultivo de los años 1995 y 1996. En ambos años el agua aplicada en RRR (606,4 mm en 1995 y 608,3 mm en 1996) fue muy próxima al valor estacional de la ETc del maíz (624,4 mm en 1995 y 605,6 mm en 1996).

En ambos años de ensayo el diseño experimental fue de bloques al azar, con 9 tratamientos de riego y 3 bloques. Las parcelas elementales, delimitadas por caballones, eran de 5 m x 9 m (45 m²) en 1995 y de 6 m x 8,6 m (52 m²) en 1996 (Fotos 3.1 y 3.2). Como sistema de distribución del riego a las parcelas elementales se utilizó una red de tubería de PVC de 200 mm de diámetro, provista de pequeñas compuertas deslizantes (gateras) cada 75 cm (HELIFLEX, Lisboa, Portugal) (Fotos 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6). El riego se efectuó mediante la apertura de una gatera por parcela, con un caudal medio de 3,5 l s⁻¹ gatera⁻¹ y 3,4 l s⁻¹ gatera⁻¹ en 1995 y 1996 respectivamente, lo que supuso un tiempo promedio de riego de 13 y 16 minutos

por parcela en 1995 y 1996 respectivamente. La cantidad de agua aplicada en cada riego se midió mediante un contador volumétrico (Foto 3.7).

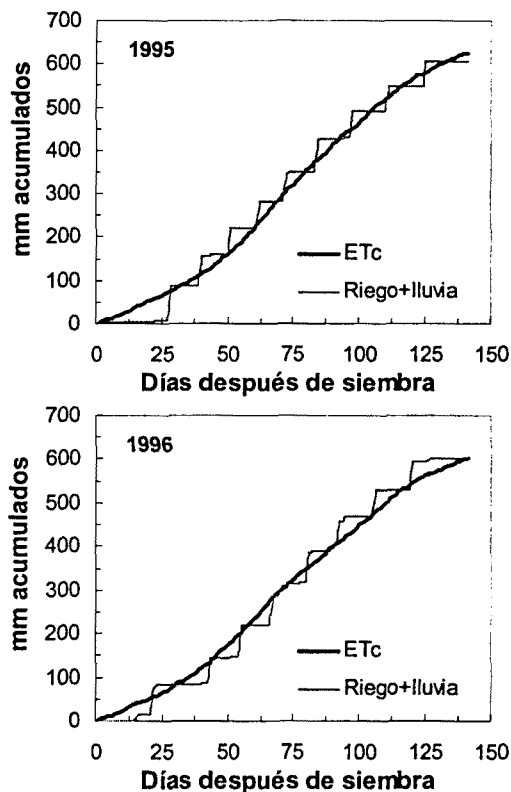


Fig. 3.2. Evapotranspiración acumulada del cultivo de maíz (ETc) y cantidad de agua aplicada acumulada (riego + lluvia) en el tratamiento RRR durante los ciclos de cultivo de 1995 y 1996.

La pequeña superficie de las parcelas elementales y el caudal de riego empleado, produjeron una alta uniformidad y eficiencia de riego (Fotos 3.8, 3.9 y 3.10). En las condiciones del ensayo las alturas de agua aplicadas se consideraron dosis netas de riego. Cabe pensar que esta hipótesis es realista y que la eficiencia real fue muy elevada. Hanson *et al.*, (1995) evaluando 72 tablares de inundación comerciales en California, encontraron eficiencias de $80 \pm 14\%$. De la misma manera, Clemmens y Dedrick (1994) encontraron un límite superior de la eficiencia del 90% para este tipo de riego. Es de esperar que las características de este ensayo en particular (riegos poco frecuentes, con dosis brutas inferiores a las

habituales y pequeños tablares de riego) resulten en eficiencias más elevadas de lo normal. Por otro lado, el suelo experimental presenta unas características físicas (Tabla 3.1) que permiten estimar la reserva de agua utilizable por el cultivo en 186 mm, muy superior a las dosis de riego aplicadas. Todas estas circunstancias hacen pensar que la eficiencia del riego fue muy alta y las pérdidas por percolación profunda fueran mínimas durante los ensayos.

2.4. Medida del agua en el suelo

En 1995 el contenido de humedad del suelo se midió mediante sonda de neutrones (modelo 3320 de Troxler Electronics Laboratories, Inc. North Carolina, EE.UU.). Las medidas se realizaron en 7 fechas en capas de 30 cm hasta 120 cm de profundidad. Además en ambos años el contenido de agua en el suelo se midió gravimétricamente hasta 120 cm de profundidad en capas de 30 cm al inicio y final de la estación de cultivo. Los valores gravimétricos se transformaron a contenido de humedad volumétrico con los valores medidos de densidad aparente del suelo.

2.5. Medidas del desarrollo del cultivo

La altura de planta, medida como la distancia entre el suelo y la base del limbo de la última hoja desarrollada, se midió aproximadamente cada diez días durante el período de cultivo (Foto 3.11). Estas medidas se realizaron en todos los tratamientos y en las mismas 3 a 4 plantas por parcela elemental durante la estación de cultivo.

La fracción de PAR interceptado por el cultivo (fIPAR) se determinó en todos los tratamientos a partir de las medidas de PAR encima del cultivo y a nivel del suelo (Ceptometer Dekagon, WA, E.E.U.U) en 6 y 8 ocasiones durante las estaciones de cultivo de 1995 y 1996 respectivamente (Foto 3.12). Para minimizar los efectos del ángulo solar, las medidas de fIPAR se realizaron a mediodía solar en días despejados.

Fotografías

Foto 3.1. Vista de la parcela experimental del S.I.A. en Montañana (Zaragoza) 12 días después de la siembra del maíz en 1995.

Foto 3.2. Construcción de caballones para delimitar las parcelas elementales.

Foto 3.3. Instalación de la red de tuberías de PVC con compuertas deslizantes en el ensayo de 1995 para el riego individualizado de las parcelas elementales.

Foto 3.4. Detalle de la conexión de la red de tuberías a una acequia de riego de la finca experimental.

Foto 3.5. Detalle de una curva de 90° instalada en la red de riego.

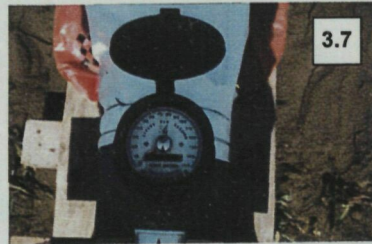
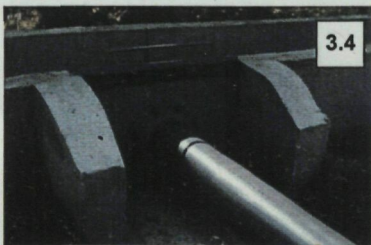
Foto 3.6. Detalle de una T instalada en la red de riego.

Foto 3.7. Contador volumétrico instalado en la cabecera de la red de riego.

Foto 3.8. Detalle del riego de una parcela elemental mediante la apertura de una compuerta deslizantes de la tubería de riego.

Foto 3.9. Vista de una de las parcelas elementales de 5 m x 9 m de superficie en el ensayo de 1995, 42 días después de siembra.

Foto 3.10. Vista general de la parcela experimental con la red de tuberías de riego en el ensayo de 1995.





El valor del índice de área foliar máximo (IAF_{máx}) se midió ambos años alrededor de floración de forma no destructiva. El área foliar por planta se obtuvo como la suma de las áreas de las hojas individuales, que se obtenía multiplicando la longitud de la hoja por la anchura máxima de hoja y por el coeficiente 0,75 (Norman y Campbell, 1991).

El área específica foliar (AEF) se midió alrededor de floración en el ensayo de 1996. El AEF se midió en 18 hojas desarrolladas en cada tratamiento. El AEF ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$) se obtuvo como la relación entre el área foliar (Area Measurement System AT Delta-T devices LTD, Cambridge, England) y el peso seco de la hoja.

El índice de enrollamiento foliar (IR) se midió en una ocasión en 1995 y en dos ocasiones en 1996, en hojas completamente desarrolladas de la parte superior de la cubierta vegetal a mediodía solar. El IR se obtuvo como la relación entre la proyección de la anchura de la hoja y la anchura de la hoja totalmente extendida (Begg, 1980) (i.e. $\text{IR} \leq 1$, $\text{IR}=1$ en hojas totalmente extendidas) (Fotos 3.13 y 3.14).

El coeficiente de extinción de luz (K) se estimó a partir de las medidas de IAF_{máx} y de fIPAR en todos los tratamientos, mediante la ley de Beer [$\text{fIPAR}=1-\exp(-k \times \text{IAF})$]. El K estimado de este modo corresponde al valor de K en floración a mediodía solar.

En 1995 se determinó la materia seca aérea total y su partición en hojas, tallos y mazorcas en 5 fechas durante la estación de cultivo mediante muestreo de una superficie de 0,5 m^2 por parcela. En 1996 se realizó un muestreo de la materia seca total de la parte aérea y su partición en los distintos órganos en floración, mediante el muestreo de una superficie de 0,7 m^2 por parcela.

Alcanzada la madurez fisiológica se realizó la cosecha final. En 1995 ésta se realizó el 5 de octubre (141 DDS) en una superficie de 9 m^2 (2 líneas centrales x 6 m de longitud) en cada parcela. En 1996 la cosecha final se realizó el 15 de octubre (152 DDS) en una superficie de 15 m^2 (4 líneas centrales x 5 m de longitud) en cada parcela. Las muestras se secaron en estufa a 70 °C hasta peso constante. Se determinó la biomasa aérea total, el rendimiento en grano, el índice de cosecha y diversos componentes del rendimiento. Todos los datos de materia seca y rendimiento se expresan como peso seco a estufa (el contenido de humedad del grano seco a estufa es aproximadamente del 6%).

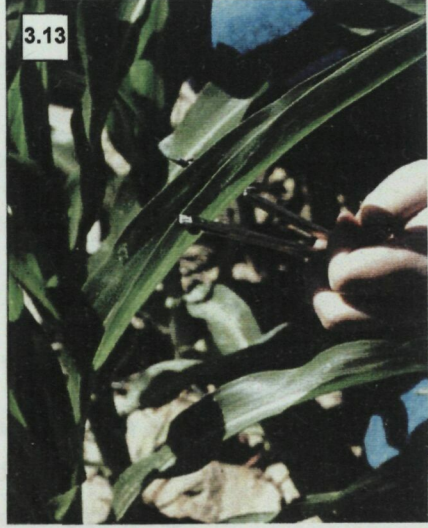
Fotografías

Foto 3.11. Detalle de la medida de la altura de planta en maíz 45 días después de siembra.

Foto 3.12. Medida de la fracción de PAR interceptado por el cultivo.

Foto 3.13. Detalle de la medida de la proyección de la anchura de una hoja para la determinación del índice de enrollamiento foliar.

Foto 3.14. Detalle de la medida de la anchura máxima de una hoja para la determinación del índice de enrollamiento foliar.



2.6. Análisis estadístico

Para la determinación de los efectos de los distintos tratamientos de riego se realizaron análisis de la varianza, test de separación de medias de Duncan y análisis de contrastes ($p < 0,05$). Los análisis estadísticos se realizaron mediante el paquete estadístico SAS (SAS, 1996).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Agotamiento del agua del suelo

La Fig. 3.3 presenta el contenido volumétrico de agua en el suelo promedio para el perfil de 0 a 120 cm de profundidad en los tratamientos RRR, rrr y sss en distintas fechas durante la estación de cultivo del año 1995.

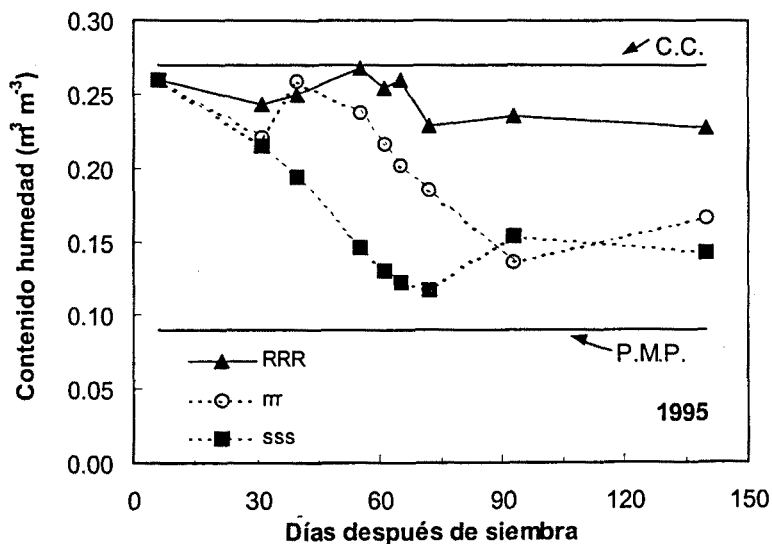


Fig. 3.3. Evolución del contenido de humedad volumétrica del suelo de 0 a 90 cm en 1995 para el tratamiento más regado (RRR), el menos regado (sss) y el tratamiento del 50 % del agua de riego en las 3 fases (rrr).

En el tratamiento RRR, el contenido de humedad del suelo se mantuvo próximo al valor de capacidad de campo durante todo el ciclo de cultivo, indicando que la cantidad de agua de riego más lluvia recibida por el cultivo fue adecuada y que el cultivo no sufrió déficit hídrico durante su crecimiento y desarrollo. En los tratamientos rrr y sss se produjo un descenso gradual del contenido de humedad del suelo, estabilizándose hacia el final de la estación de cultivo.

La Fig. 3.4 presenta el perfil de humedad del suelo al principio y al final de la estación de cultivo para los distintos tratamientos de riego en el ensayo del año 1996. En todos los tratamientos el contenido de humedad del suelo al final del ciclo fue inferior al inicial en todas las profundidades, lo que indica que el cultivo fue capaz de extraer agua del suelo en todo el perfil. Sin embargo las mayores extracciones tuvieron lugar en los 90 primeros cm de suelo. Estos resultados concuerdan con los indicados por Gordon *et al.*, (1995), que encontraron una extracción prácticamente nula por debajo de esta profundidad en maíz regado y no regado cultivado en un suelo de similares características.

Los resultados encontrados en este trabajo contrastan con la extracción de agua mayoritaria de las capas superficiales del suelo, encontrada en ensayos riego deficitario usando una fuente lineal de aspersión y riegos de alta frecuencia en maíz (Capítulo 2) y con los trabajos de Singh y Singh (1995) que encontraron que el maíz extraía la mayor parte del agua de capas superficiales. Estas diferencias en el patrón de extracción de agua fueron asociadas a un distinto desarrollo radical en el maíz como consecuencia de las diferencias en el sistema y frecuencia de riego.

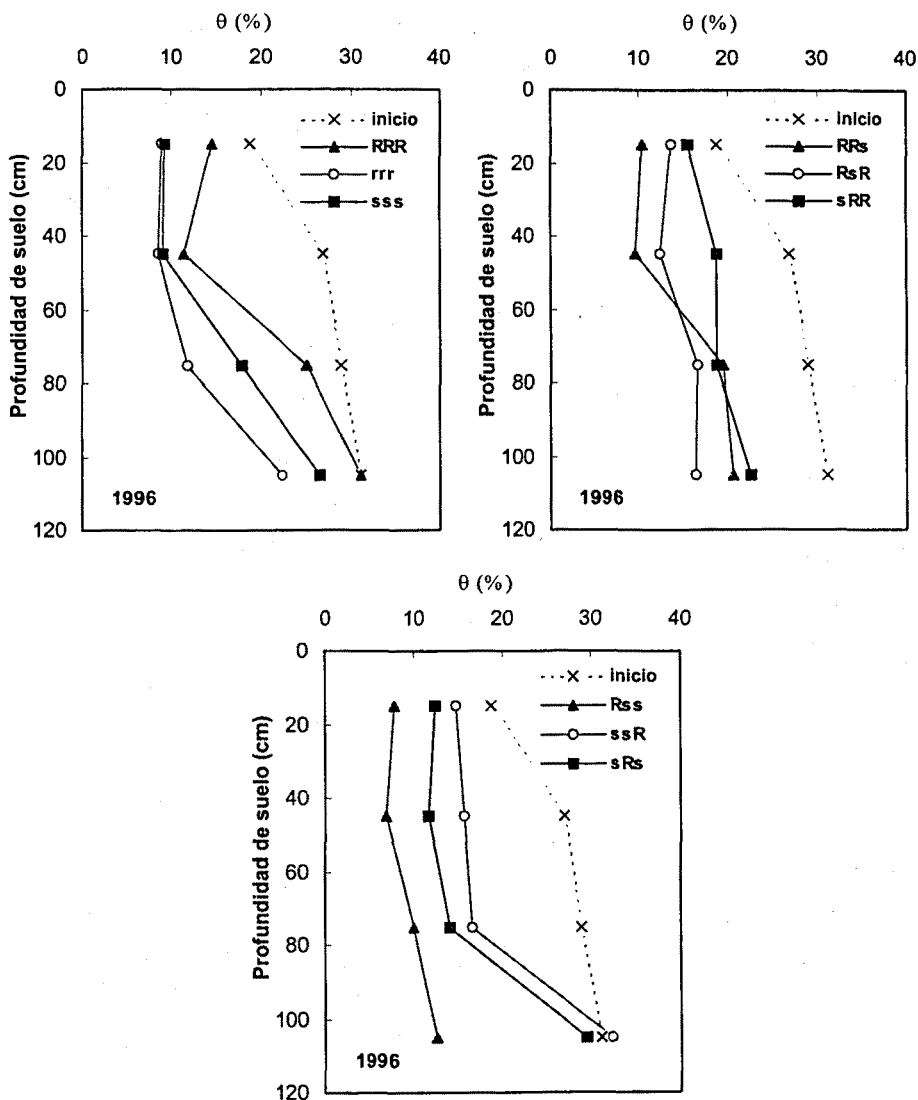


Fig. 3.4. Perfiles de humedad volumétrica (θ) al inicio de la estación de cultivo (línea discontinua) y en cosecha (líneas continuas) para todos los tratamientos de riego en 1996.

La Tabla 3.4 presenta el agotamiento del agua del suelo, calculado como la diferencia entre la lámina de agua almacenada en el suelo al inicio y al final del ciclo

de cultivo, para los distintos tratamientos de riego en los años 1995 y 1996. Se encontró una alta variabilidad en los valores de agotamiento de agua entre tratamientos y entre bloques. Estas diferencias fueron atribuidas a la variabilidad de la profundidad del suelo y a los cambios texturales del suelo debidos a su naturaleza aluvial. En general el agotamiento de agua del suelo fue mayor en 1996 que en 1995. Estas diferencias fueron atribuidas al nivel menos severo de estrés hídrico del cultivo en 1996, como consecuencia de las mayores precipitaciones registradas (103mm durante la estación, 48 mm alrededor de floración). Para tratamientos análogos de riego, el desarrollo vegetativo fue superior en 1996 y por tanto también fue mayor la capacidad de extracción de agua del suelo. En general, en el año 1995 los tratamientos con riego deficitario en una sola fase extrajeron menos agua que los tratamientos con riego deficitario en dos fases. En 1996 no se encontraron diferencias significativas entre la mayoría de tratamientos.

Tabla 3.4. Agotamiento del agua del suelo (AAS) entre el fin y el inicio de la estación de cultivo en los distintos tratamientos de riego en 1995 y 1996.

1995			1996		
Trat.	AAS (mm)		Trat.	AAS (mm)	
RRR	36,3	de	RRR	62,8	a
Rs'R	72,5	cde	RRs	131,7	ab
RsR	86,8	cde	RsR	125,3	ab
sRR	29,8	e	sRR	82,1	a
Rss	173,7	a	Rss	186,6	b
ssR	121,7	abc	ssR	74,8	a
sRs	97,6	cde	sRs	110,2	ab
sss	168,7	ab	sss	126,1	ab
rrr	103,2	bcd	rrr	130,3	ab

En una misma columna, valores seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$; Duncan).

3.2. Desarrollo del cultivo

Altura de planta

La Figura 3.5 presenta la evolución de la altura de planta en los distintos tratamientos de riego en los años 1995 y 1996. En el año 1995 la altura de planta no se vio significativamente afectada por los tratamientos de riego, excepto en el tratamiento sss (Fotos 3.15 y 3.16). En el año 1996, la altura de planta fue similar

en todos los tratamientos durante la fase vegetativa (fase I). Este año, las mayores diferencias entre tratamientos se observaron al final de la fase de floración (fase II), cuando la altura de planta en los tratamientos RRR y RRr era significativamente mayor que en los tratamientos sss, RsR y ssR ($P < 0,05$; Duncan). No se encontraron diferencias significativas entre el resto de tratamientos.

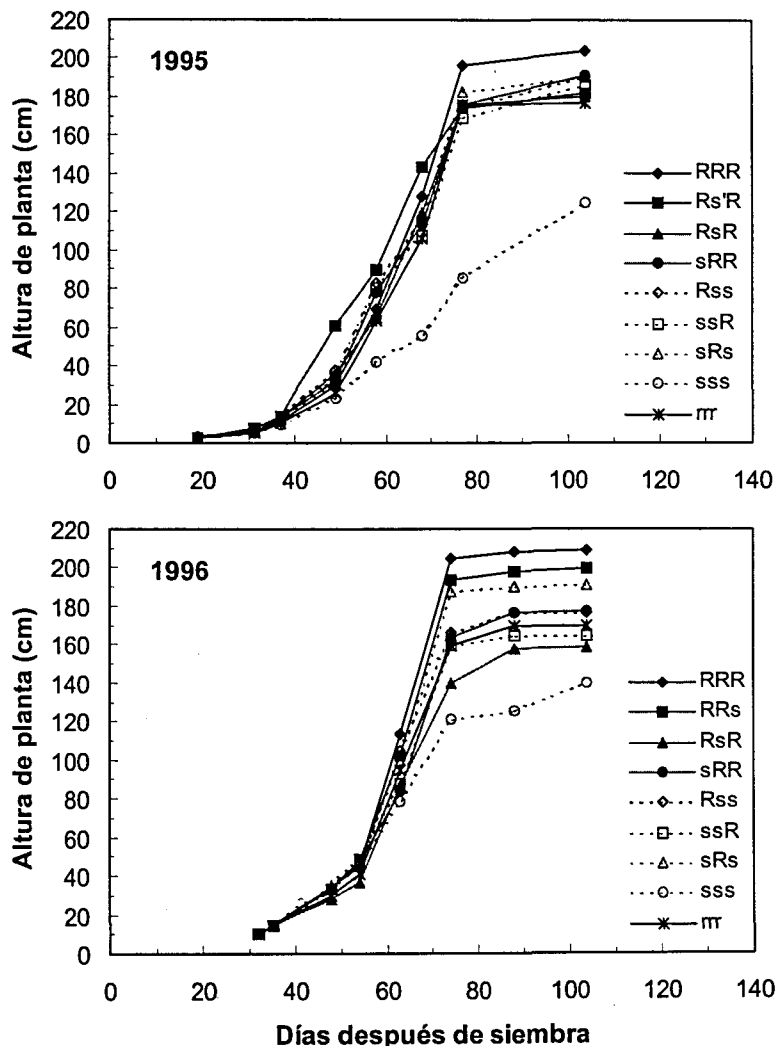


Fig. 3.5. Evolución de la altura de planta para los distintos tratamientos de riego en los años 1995 y 1996.

Fracción de PAR interceptado por el cultivo

La evolución de la fracción de PAR interceptado por el cultivo (fIPAR) (Fig. 3.6) tuvo un comportamiento similar al de la altura de planta.

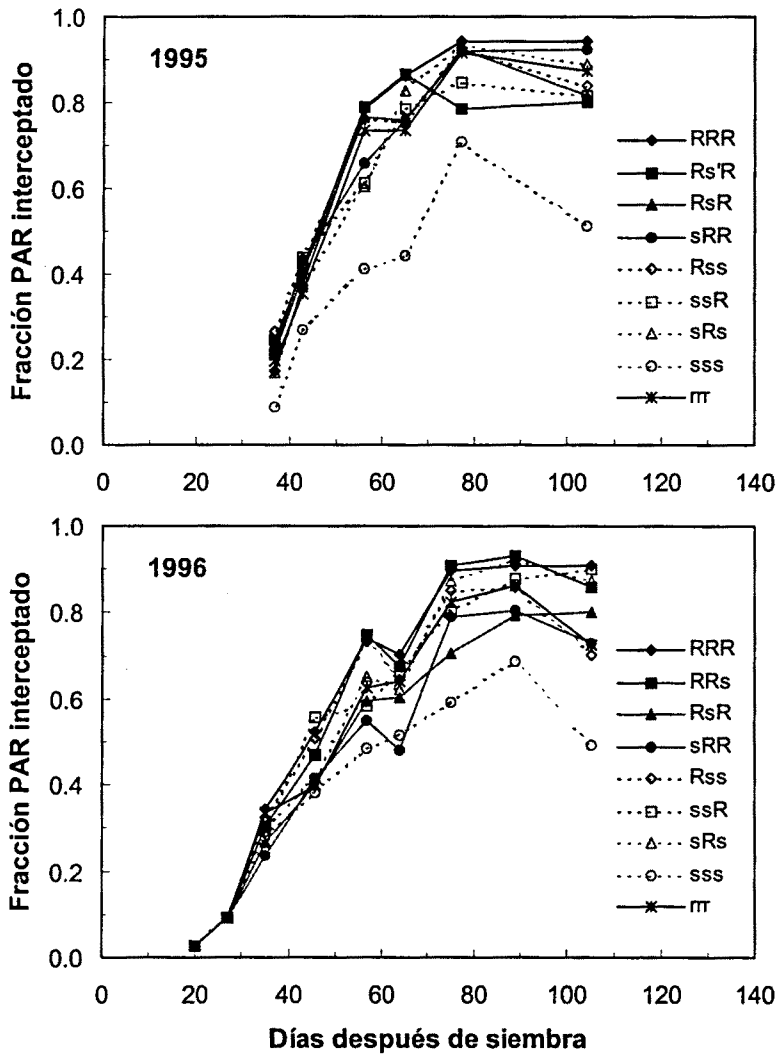


Fig. 3.6. Evolución de la fracción de PAR interceptado por el cultivo (fIPAR) para los distintos tratamientos de riego en 1995 y 1996.

En 1995 el tratamiento sss fue el único en el que se midieron valores de fIPAR significativamente menores que en el tratamiento RRR a lo largo del ciclo de cultivo. En el año 1996 los tratamientos sss, Rss y RsR tuvieron valores de fIPAR máximo significativamente inferiores ($P > 0,05$; Duncan) que el RRR. En los tratamientos con riego deficitario en las dos últimas fases (Rss, sss) se observó una rápida caída en el valor de fIPAR, lo que indica un adelanto en la senescencia foliar. NeSmith y Ritchie (1992b) también encontraron un adelanto en la senescencia foliar en maíz sometido a déficit hídrico severo durante el período de llenado del grano. Cuando el área foliar ya se ha desarrollado completamente, la reducción de la radiación interceptada por el cultivo mediante el adelanto en la senescencia foliar es uno de los mecanismos de adaptación al estrés hídrico que se han citado en la literatura.

Área foliar

El valor del índice de área foliar máximo (IAFmáx) (Tabla 3.5), medido alrededor de floración, únicamente se vio significativamente afectado en el tratamiento más deficitario (sss) en ambos años ($P < 0,05$; Duncan). En el resto de tratamientos no se observaron diferencias significativas, lo que indica que hasta el momento de floración los niveles de estrés hídrico alcanzados no causaron reducciones significativas en el desarrollo del área foliar.

Tabla 3.5. Valores del índice de área foliar máximo (IAFmáx), medido en floración, en los distintos tratamientos de riego en 1995 y 1996.

1995		1996	
Trat.	IAFmáx (m ² m ⁻²)	Trat.	IAFmáx (m ² m ⁻²)
RRR	5,60 a	RRR	4,75 ab
Rs'R	4,99 ab	RRs	4,92 ab
RsR	4,86 ab	RsR	4,29 ab
sRR	4,59 ab	sRR	4,30 ab
Rss	5,78 a	Rss	4,92 a
ssR	5,21 ab	ssR	4,38 ab
sRs	4,80 ab	sRs	4,48 ab
sss	2,89 c	sss	2,76 c
rrr	5,07 ab	rrr	4,27 ab

*En una misma columna, valores seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$; Duncan).

Área específica foliar (AEF)

El valor promedio del AEF medido en floración en el ensayo de 1996 fue de $0,016 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ($P > 0,05$).

Algunos autores han encontrado valores menores de AEF (hojas más gruesas) como consecuencia de estrés hídrico o salino (Cramer *et al.*, 1994) en maíz. En este trabajo los tratamientos de riego deficitario no tuvieron un efecto significativo sobre el valor del AEF, lo que concuerda con la apreciación anterior de que no se produjeron niveles severos de estrés hídrico.

Índice de enrollamiento (IR)

La Fig. 3.7 muestra los valores de IR foliar medidos al final de la fase I (en 1995 y 1996) y durante la fase II (en 1996). Los tratamientos sometidos a riego deficitario en la fase I (s - -) presentaron, durante la fase I, mayor enrollamiento foliar (menor valor de IR) que el tratamiento control (R - -). Los tratamientos sometidos a riego deficitario en la fase II (- s -), presentaron, durante la fase II, mayor enrollamiento foliar que los tratamientos con riego completo en esta fase (- R -).

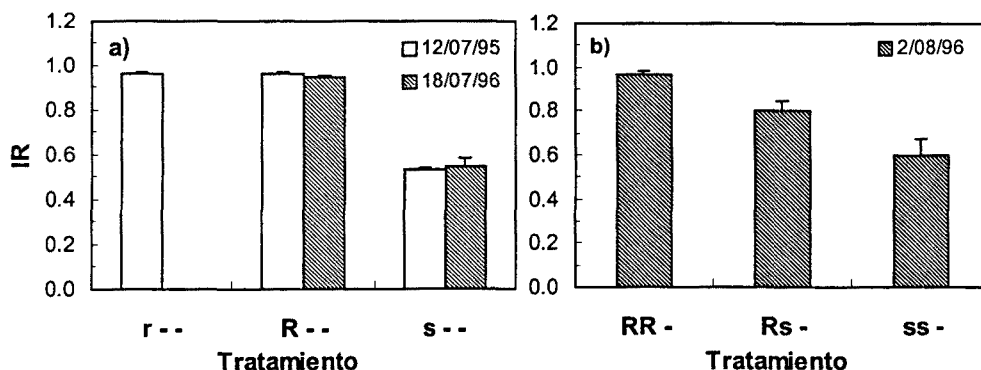


Fig. 3.7. Valores del índice de enrollamiento foliar (IR) medidos al final de la fase I en 1995 y 1996 (a) y en floración en 1996 (b). Las barras sobre las columnas de IR indican el valor del error estándar.

El enrollamiento foliar es uno de los mecanismos de reducción de la radiación interceptada como respuesta al estrés hídrico. Además de reducir la radiación interceptada por el cultivo, el enrollamiento foliar se cita en la literatura como un mecanismo de reducción de la transpiración y por tanto de ahorro de agua en momentos de déficit hídrico (Begg, 1980; Turner, 1986). El enrollamiento foliar es muy sensible a cambios diurnos en déficits hídricos foliares y permite a la planta responder de forma rápida a periodos de alta demanda evaporativa y recuperarse rápidamente cuando la demanda evaporativa es menor. Estudios de IR en sorgo (Begg, 1980) mostraron que bajo un suministro hídrico adecuado apenas se producían variaciones de IR a lo largo del día, mientras que en condiciones de estrés se producía una oscilación del IR a lo largo del día, con valores mínimos poco después del mediodía solar y valores máximos al amanecer y anochecer.

Las medidas realizadas alrededor de mediodía solar, cuando se observan las mayores diferencias en IR entre tratamientos, mostraron que el enrollamiento foliar fue un mecanismo de respuesta al estrés hídrico durante el periodo de riego deficitario y que este proceso fue reversible: el cultivo se recuperaba en las fases en las que cesaba el riego deficitario.

Coefficiente de extinción de luz (K)

La Fig. 3.8 presenta los valores de K estimados en floración a mediodía solar para los distintos tratamientos en 1995 y 1996. En los tratamientos de riego deficitario en la fase II (-s-) el valor de K era significativamente menor que en el tratamiento RRR, independientemente del régimen de riegos en la fase I. Los bajos valores de K en los tratamientos -s- indicaron un cambio en la arquitectura foliar como respuesta al estrés hídrico. En los tratamientos de riego deficitario, el cultivo disminuyó el valor de K mediante un mayor enrollamiento foliar y una disposición más vertical de las hojas (Foto 3.16).

Cuando el área foliar se ha desarrollado completamente, uno de los mecanismos de adaptación al estrés es a través del cambio en el ángulo foliar, consistente en una disposición más vertical de las hojas. Este mecanismo permite reducir la radiación interceptada por el cultivo en momentos de menor disponibilidad hídrica. El cambio en la orientación de las hojas puede evitar un

sobrecalentamiento y reducir la transpiración, con el consiguiente ahorro de agua. Estos mecanismos de disposición y orientación de las hojas consiguen una considerable reducción en la interceptación de radiación, particularmente durante el periodo de máxima intensidad lumínica. Una característica importante del cambio de orientación de las hojas es la reversibilidad y la rapidez en recuperación cuando cesa el estrés y la posibilidad de que el rendimiento no sea seriamente reducido.

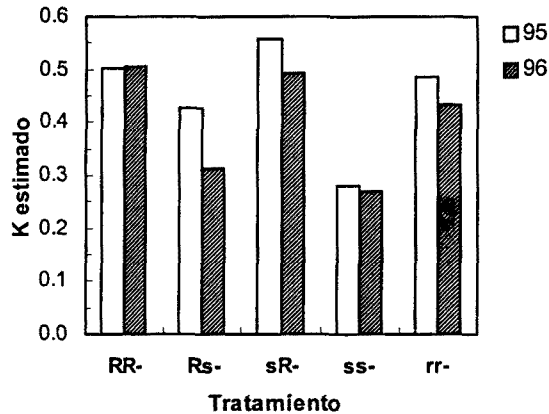


Fig. 3.8. Valores estimados en floración del coeficiente de extinción de luz (K) para los distintos tratamientos en 1995 y 1996.

3.3. Acumulación de la materia seca aérea

La Fig. 3.9 presenta la evolución de la materia seca aérea y su partición en hojas, tallos y mazorca en los distintos tratamientos de riego en 1995. En los tres muestreos realizados durante la fase vegetativa no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en el valor de materia seca aérea total acumulada. En floración (cuarto muestreo), la materia seca aérea en el tratamiento sss fue significativamente menor que en el resto de los tratamientos. El estrés hídrico producido por los tratamientos de riego deficitario no causó reducciones significativas en la materia seca aérea acumulada hasta el momento de floración, excepto en el tratamiento sss. El muestreo realizado 96 DDS (quinto muestreo) indicó que la materia seca acumulada se había reducido significativamente respecto al tratamiento RRR en todos los tratamientos excepto en el tratamiento sRs. Estos resultados indican que los tratamientos de riego deficitario (s) durante la

fase vegetativa no redujeron la biomasa aérea acumulada y que el riego deficitario durante la fase de floración causó reducciones significativas en la biomasa aérea en la mayoría de tratamientos. El efecto sobre la materia seca fue asociado a la reducción en materia seca de hojas, tallos y mazorca (Fig. 3.9).

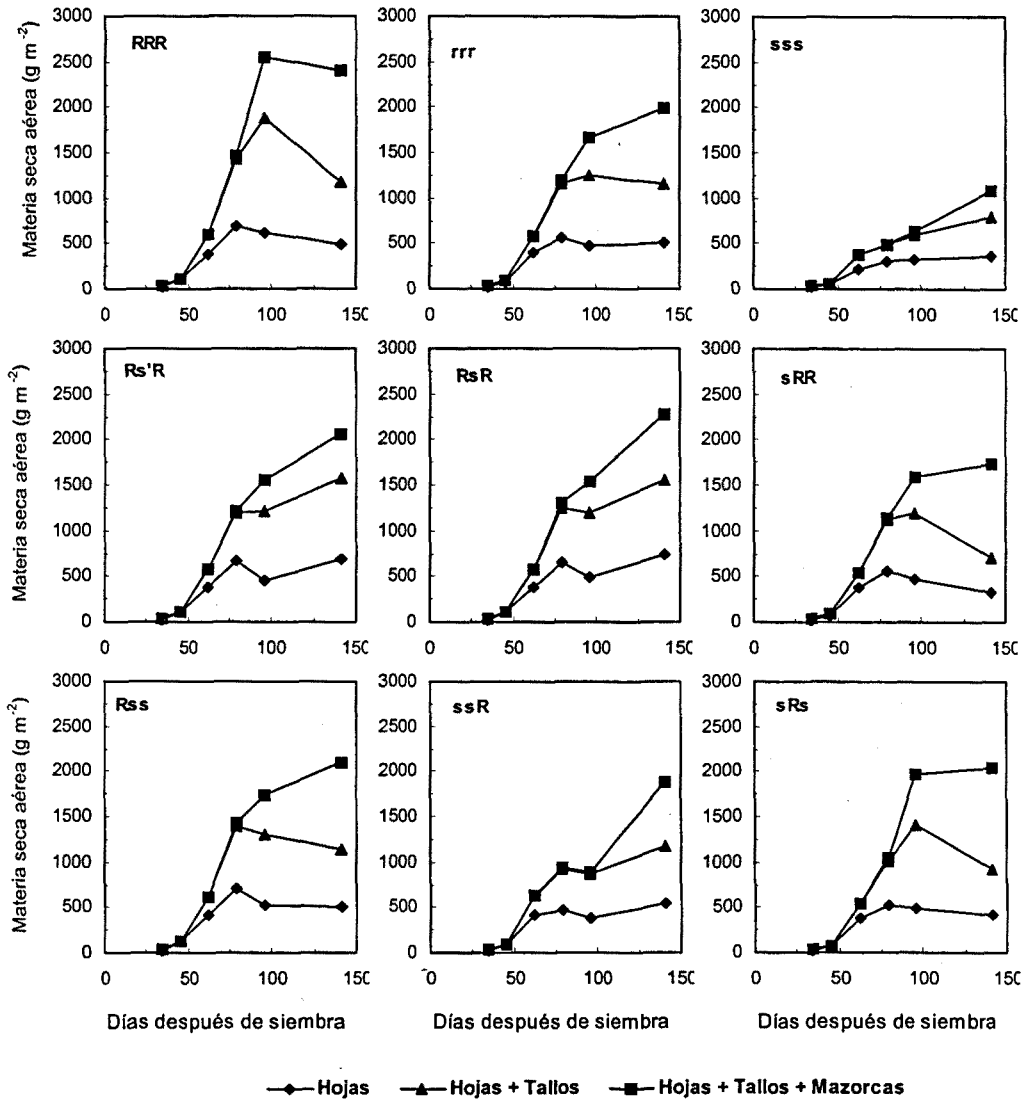


Fig. 3.9. Evolución de la materia seca aérea y su participación en hojas, tallos y mazorcas en los distintos tratamientos de riego de 1995.

En 1996, la materia seca acumulada hasta floración (Foto 3.17) se redujo significativamente en los tratamientos de riego deficitario en la fase II (Rs- y ss-) respecto al tratamiento RRR (Fig. 3.10). No se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento RRR y el tratamiento de riego intermedio (rr-) o los tratamientos de riego deficitario en la fase I y riego completo en la fase II (sR-).

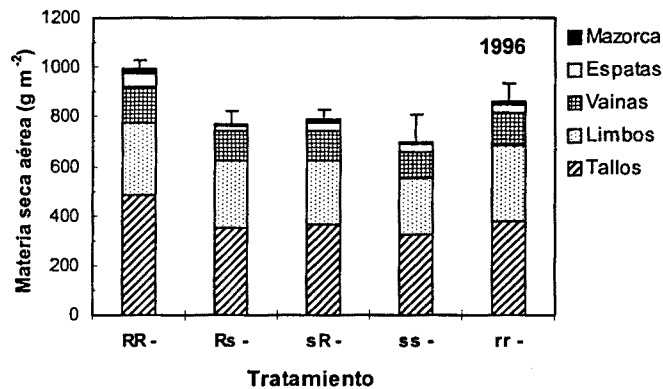


Fig. 3.10. Materia seca aérea y su partición en tallos, limbos, vainas, espatas y mazorcas en los distintos tratamientos en floración en 1996. Las barras indican el valor del error estándar.

3.4. Materia seca aérea final, rendimiento e índice de cosecha

Materia seca aérea final

En el análisis conjunto de los valores de materia seca aérea final para los dos años de ensayo y para los 8 tratamientos de riego comunes en ambos años, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de riego. No se encontraron diferencias entre años (promedio = 1873,1 g m⁻²). La interacción año x tratamiento no resultó significativa.

En 1995 la producción de materia seca aérea en cosecha únicamente se vio reducida significativamente respecto a RRR en el tratamiento sss (Tabla 3.6). En 1996 se encontró una mayor variabilidad en la producción final de materia seca aérea en los distintos tratamientos. La producción final de materia seca aérea en los tratamientos sss y Rss fue significativamente menor que en el tratamiento RRR.

Tabla 3.6. Valores de la producción de materia seca aérea (MS), rendimiento en grano seco a estufa (GRANO) e índice de cosecha (IC) en los distintos tratamientos de riego en 1995 y 1996.

Año	Trat.	MS		GRANO		IC	
			(g m ⁻²)		(g m ⁻²)		(-)
1995	RRR	2397,0	a	1096,0	a	0,46	ab
	Rs'R	2060,9	a	432,5	cd	0,21	cd
	RsR	2280,2	a	663,5	bc	0,30	bcd
	sRR	1740,5	a	939,3	ab	0,59	a
	Rss	2092,8	a	860,8	ab	0,41	abc
	ssR	1872,2	a	625,9	bc	0,32	bcd
	sRs	2035,8	a	1010,2	ab	0,49	ab
	sss	656,2	b	102,7	d	0,16	d
	rrr	1994,8	a	756,4	abc	0,39	abc
1996	RRR	2272,7	a	1233,7	a	0,54	a
	RRs	1955,3	abc	1073,7	ab	0,55	a
	RsR	1572,5	abc	736,6	bc	0,46	ab
	sRR	1960,6	abc	1075,7	ab	0,55	a
	Rss	1373,3	bc	582,9	c	0,41	ab
	ssR	1843,8	abc	969,7	abc	0,53	a
	sRs	2024,2	ab	1110,0	ab	0,55	a
	sss	1221,4	c	562,2	c	0,33	b
	rrr	1705,9	abc	902,8	abc	0,53	a

Para cada año, valores seguidos de la misma letra en una misma columna no son significativamente diferentes (P<0,05; Duncan).

Para el estudio del efecto del riego deficitario en las distintas fases se realizaron análisis de contrastes entre los tratamientos con riego completo (R) o riego deficitario (s) en las distintas fases (Tabla 3.7). La materia seca aérea final se redujo en los tratamientos de riego deficitario en la fase I (s - -) en 1995 y por riego deficitario en la fase II (- s -) en 1996. El riego deficitario en la fase III (- - s) no afectó significativamente (P<0,05) la materia seca aérea final.

Tabla 3.7. Contrastes para la materia seca aérea total (MS), el rendimiento en grano (GRANO) e índice de cosecha (IC) entre los tratamientos con riego completo (R) o riego deficitario (s) en las distintas fases de desarrollo en 1995 y 1996.

Trat.	MS (g m ⁻²)		GRANO (g m ⁻²)		IC (-)	
	1995	1996	1995	1996	1995	1996
R - -	2256,7 a	1793,5 a	873,5 a	906,7 a	0,41 a	0,49 a
s - -	1659,8 b	1894,2 a	721,1 b	1013,4 a	0,39 a	0,53 a
-R -	2057,7 a	2053,2 a	1015,2 a	1123,3 a	0,51 a	0,55 a
-s -	1822,6 a	1610,8 b	605,1 b	777,1 b	0,31 b	0,47 b
--R	2072,5 a	1912,4 a	831,2 a	1003,9 a	0,42 a	0,52 a
--s	1712,3 a	1764,4 a	727,3 a	907,3 a	0,38 a	0,50 a

En un mismo contraste, valores seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Rendimiento en grano

En el análisis conjunto de los valores de rendimiento en grano para los dos años de ensayo y para los 8 tratamientos de riego comunes en ambos años, se encontraron diferencias significativas entre tratamientos y entre años y una interacción significativa entre año y tratamiento. El rendimiento en grano, expresado como rendimiento seco a estufa, fue más bajo en 1995 (promedio = 785,3 g m⁻²) que en 1996 (promedio = 935,4 g m⁻²). Estas diferencias fueron atribuidas a diferencias en climatología entre años. En particular la precipitación registrada durante la estación de cultivo fue mayor en 1996 que en 1995.

En ambos años los mayores rendimientos en grano se obtuvieron en el tratamiento RRR (1096,0 g m⁻² en 1995 y 1233,7 g m⁻² en 1996) y los menores rendimientos en el tratamiento sss (102,7 g m⁻² en 1995 y 562,2 g m⁻² en 1996) (Foto 3.18). En ambos años el rendimiento en grano del tratamiento sss fue significativamente diferente del tratamiento RRR (Tabla 3.6). Debido a la alta variabilidad hallada en los valores del rendimiento en grano, no se detectaron diferencias significativas entre el resto de los tratamientos. Esta variabilidad fue atribuida, en parte, a la variabilidad en profundidad de suelo existente en la parcela.

Para el estudio del efecto del riego deficitario en cada una de las fases se realizaron análisis de contrastes (Tabla 3.7). El análisis de contrastes mostró que el rendimiento en grano se redujo significativamente en los tratamientos con riego deficitario en la fase II ($P < 0.01$) en ambos años y con riego deficitario en la fase I ($P < 0,05$) en 1995. El riego deficitario en la fase III no afectó significativamente ($P < 0,05$) el rendimiento en grano.

Estos resultados confirman la alta sensibilidad del cultivo de maíz al déficit hídrico en la fase de floración, indicada en trabajos previos (Struik *et al.*, 1986; NeSmith and Ritchie, 1992a). Además, indican que dicha sensibilidad no sólo se manifiesta en condiciones de ausencia o suspensión total del riego, sino que un déficit hídrico moderado en la fase de floración o vegetativa, producido por un mayor intervalo entre riegos, ocasiona importantes reducciones en el rendimiento en grano.

El riego deficitario en la fase I redujo el rendimiento y la biomasa aérea total en 1995, pero no tuvo efectos significativos en 1996. Las diferencias entre años pueden ser atribuidas a las diferencias en el régimen de lluvias. El año 1995 fue particularmente seco, con precipitaciones inferiores a las del año medio. El año 1996 se caracterizó por una precipitación total durante la estación de cultivo muy próxima a la del año medio, aunque con precipitación en julio y agosto superior a la del año medio. Estos resultados contrastan con los encontrados por Abrecht y Carberry (1993), que indicaron que un moderado déficit hídrico durante el período vegetativo del maíz redujo la altura de planta y la biomasa total, pero no determinó un menor rendimiento final en grano.

Índice de cosecha

En el análisis conjunto de los valores de índice de cosecha para los dos años de ensayo y para los 8 tratamientos de riego comunes en ambos años, se encontraron diferencias significativas entre tratamientos y entre años. Sin embargo la interacción año x tratamiento no resultó significativa. El índice de cosecha fue menor en 1995 (promedio = 0,4) que en 1996 (promedio = 0,5).



Fotografías

Foto 3.15. Plantas de maíz del tratamiento de riego completo en las tres fases del cultivo (RRR) 58 días después de siembra en 1995.

Foto 3.16. Plantas de maíz del tratamiento de riego deficitario en las tres fases del cultivo (sss) 58 días después de siembra en 1995.

Foto 3.17. Detalle de la floración femenina en maíz en el tratamiento de riego completo (RRR).

Foto 3.18. Detalle de una mazorca del tratamiento de riego completo (RRR) en cosecha.



El rendimiento en grano se vio más afectado que la producción total de materia seca por los tratamientos de riego deficitario, como se muestra por la reducción del IC. En ambos años el IC se redujo significativamente en el tratamiento sss (0,16 en 1995 y 0,33 en 1996) respecto al tratamiento RRR (Tabla 3.6).

El análisis de contrastes indicó una reducción significativa en el IC en los tratamientos con riego deficitario en la fase II en ambos años (Tabla 3.7). El riego deficitario en la fase I y en la fase III no tuvieron efectos significativos en el valor del IC. NeSmith y Ritchie (1992a) también encontraron que la producción de grano se vio más afectada que la producción de biomasa total en maíz sometido a estrés hídrico severo en floración.

3.5. Componentes del rendimiento

La Tabla 3.8 presenta el valor de los componentes del rendimiento: peso del grano, número de mazorcas por metro cuadrado (N° mazorcas m^{-2}), número de granos por mazorca (N° granos mazorca $^{-1}$) y número de granos por metro cuadrado (N° granos m^{-2}) en los distintos tratamientos de riego en 1995 y 1996. Las reducciones de rendimiento en los tratamientos con riego deficitario en alguna de las fases del desarrollo del maíz se produjeron fundamentalmente por reducción en el N° granos m^{-2} . En general, el número de granos se vio significativamente más afectado por los niveles de déficit hídrico impuestos en el ensayo que el peso del grano.

En 1995 los tratamientos de riego deficitario tuvieron un mayor efecto en los componentes del rendimiento que en 1996. Las diferencias pueden atribuirse en parte al régimen de lluvias durante la estación de cultivo entre años. El peso del grano se redujo significativamente en los tratamientos sss y rrr respecto al tratamiento RRR en 1995, mientras que no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en 1996. El número de mazorcas por m^2 se redujo significativamente en los tratamientos sss y Rs'R respecto al tratamiento RRR en 1995 y no hubo diferencias en 1996. El número de granos por mazorca se redujo significativamente en los tratamientos Rs'R, ssR y sss en 1995 y no se vio afectado por los tratamientos de riego deficitario en 1996. El número de granos por m^2 ,

obtenido como producto del número de mazorcas por m² y el número de granos por mazorca, se vio más afectado por los tratamientos de riego deficitario que estos dos últimos componentes del rendimiento. El número de granos por m² se vio significativamente reducido en los tratamientos Rs'R, RsR, ssR y sss en 1995 y en los tratamientos RsR y Rss en 1996 respecto al tratamiento RRR.

Tabla 3.8. Componentes del rendimiento: Peso del grano, N° mazorcas m⁻², N° granos mazorca⁻¹ y N° granos m⁻² en los distintos tratamientos de riego en 1995 y 1996

Año	Trat.	Peso del grano (mg)	N° mazorcas m ⁻²	N° granos mazorca ⁻¹	N° granos m ⁻²
1995	RRR	308,8 a	6,7 a	531,0 a	3574,2 a
	Rs'R	302,7 a	3,2 bc	413,0 b	1403,0 cd
	RsR	301,9 a	4,9 ab	441,8 ab	2212,9 bc
	sRR	290,1 ab	6,4 a	494,7 ab	3223,5 ab
	Rss	284,8 ab	6,2 a	472,0 ab	3003,1 ab
	ssR	293,1 ab	5,0 ab	391,5 b	2094,8 bc
	sRs	293,9 ab	6,6 a	521,2 a	3427,6 a
	sss	239,9 c	1,8 c	225,2 c	422,2 d
	rrr	264,3 bc	6,0 a	476,0 ab	2870,4 ab
1996	RRR	326,8 a	7,5 a	507,9 a	3791,0 a
	RRs	321,9 a	7,2 a	467,0 a	3339,4 ab
	RsR	297,9 a	6,3 a	383,8 a	2427,7 bc
	sRR	321,8 a	7,2 a	464,8 a	3342,2 ab
	Rss	286,5 a	5,8 a	336,9 a	2026,8 c
	ssR	304,9 a	6,6 a	481,8 a	3174,1 ab
	sRs	320,6 a	7,0 a	496,0 a	3460,6 ab
	sss	297,5 a	4,4 a	420,0 a	2792,6 abc
	rrr	308,6 a	6,7 a	432,7 a	2921,3 abc

Para cada año, en una misma columna, valores seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$; Duncan).

El análisis de contrastes indicó que el riego deficitario en la fase I tuvo un efecto significativo ($P < 0,05$) en el número de granos por m² en 1995 y que no tuvo efecto en 1996 (Tabla 3.9). El riego deficitario durante la fase II redujo

significativamente ($P < 0,01$) el número de granos por m^2 en 1995 y 1996. En ambos años el riego deficitario durante la fase III no afectó al número de granos.

Tabla 3. 9. Contrastes para los componentes del rendimiento: Peso del grano (mg) y N° granos m^2 , entre los tratamientos con riego completo (R) o riego deficitario (s) en las distintas fases de desarrollo en 1995 y 1996.

Trat.	Peso del grano (mg)		N° granos m^2	
	1995	1996	1995	1996
R - -	298,5 a	303.7 a	2930.1 a	2748.5 a
s - -	282,8 b	312.4 a	2462.0 b	3228.7 a
- R -	297.6 a	323.1 a	3408.4 a	3531.3 a
- s -	283.6 b	296.6 a	2070.6 b	2588.3 b
-- R	298.5 a	312.9 a	2776.3 a	3183.8 a
-- s	277.0 b	302.0 a	2517.1 a	2755.9 a

En un mismo contraste, valores seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

En los dos años, las mayores reducciones en el número de granos m^2 se produjeron en los tratamientos sometidos a riego deficitario en la fase de floración (fase II), independientemente del régimen de riegos en las fases anterior y posterior. La reducción en el número de granos en los tratamientos que tuvieron riego deficitario en la fase II respecto al tratamiento RRR fue de 48,9% y 31,3% en 1995 y 1996 respectivamente. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Struik *et al.* (1986), que hallaron que el estrés hídrico en maíz en la fase de floración producía una desincronización entre floración masculina y femenina, impidiendo la formación de grano y por tanto conduciendo a un menor número de granos. NeSmith y Ritchie (1992a) indicaron que el número de granos se reducía en caso de déficit hídrico en floración y que esta reducción era proporcional a la duración del déficit hídrico. Grant *et al.* (1989) y Otegui y Bonhomme (1998) indicaron que el número final de granos de maíz se establece alrededor de 2 o 3 semanas después de floración.

Se hallaron diferencias entre años en cuanto al efecto de los tratamientos de riego deficitario sobre el peso del grano. En 1995 el riego deficitario en las fases I, II y III redujo significativamente el peso del grano. La reducción en el peso del grano en los tratamientos con riego deficitario en la fase I, fase II y fase III fue de 9,6%, 7,9% y 11,6% respectivamente. En 1996 no se encontraron efectos significativos ($P > 0,05$) del riego deficitario sobre el peso del grano en ninguna de las fases. Estos resultados confirman que los niveles de estrés hídrico en 1995 fueron más severos que en 1996.

NeSmith y Ritchie (1992b) encontraron que el déficit hídrico severo durante el período de llenado afectaba al peso del grano, debido a una menor duración del período de llenado de grano, lo que concuerda con la reducción en el peso de grano encontrada por el riego deficitario en la fase III en 1995. Sin embargo, Eck (1986) encontró que únicamente el estrés hídrico durante el llenado del grano reducía el peso del grano, lo que contrasta con los resultados del año 1995 en que el peso del grano se redujo por déficit hídrico en cualquiera de las fases.

Algunos trabajos han indicado una cierta compensación en el peso del grano cuando el número de granos se ha reducido por déficit hídrico durante la fase vegetativa y cesa el estrés en fases posteriores (Eck, 1986). En este trabajo no se encontró aumento en el peso del grano en ningún caso en los que se redujo el número de granos. Los resultados hallados concuerdan con los de (Grant *et al.*, 1989) que encontró reducción en el número de granos sin aumento en el peso del grano en ningún caso. El aumento del peso del grano encontrado en algunos casos, puede ser debido en parte a la eliminación de los granos más pequeños. Por tanto, no existe la certeza que el peso del grano pueda aumentar compensando la reducción en el número de granos. Sin embargo, parece que puede existir el potencial para aumentar el peso del grano cuando el número de granos se ha reducido por déficit hídrico después que se ha desarrollado una importante área foliar durante el periodo vegetativo. Que se produzca o no dicha compensación puede depender del momento e intensidad en que se haya producido el estrés hídrico y el régimen hídrico antes y después de dicho déficit.

Características de la mazorca

No se hallaron diferencias significativas entre años en cuanto a los caracteres de mazorca: diámetro de mazorca, número de filas por mazorca, número de granos por fila (Tabla 3.10). La longitud de mazorca fue significativamente mayor en 1996 que en 1995.

Tabla 3.10. Características de la mazorca: diámetro de mazorca (diámetro), número de filas por mazorca (Nº filas mazorca⁻¹), número de granos por fila (Nº granos fila⁻¹) y longitud de mazorca (longitud) en los distintos tratamientos de riego en 1995 y 1996.

Año	Trat.	Diámetro (mm)	Nº filas mazorca ⁻¹	Nº granos fila ⁻¹	Longitud (cm)
1995	RRR	46,3 a	16,3 a	32,6 a	18,0 a
	Rs'R	43,5 a	15,1 b	27,4 ab	16,5 ab
	RsR	45,2 a	16,2 ab	27,2 ab	16,8 ab
	sRR	45,0 a	16,1 ab	30,6 ab	16,8 ab
	Rss	57,2 a	15,9 ab	29,7 ab	16,9 ab
	ssR	43,1 a	15,3 ab	25,4 b	14,9 b
	sRs	45,4 a	15,8 ab	32,9 a	17,4 a
	sss	36,8 a	12,9 c	17,4 c	11,8 c
	rrr	43,3 a	15,9 ab	29,9 ab	16,4 ab
1996	RRR	47,1 a	15,7 a	32,4 a	17,4 a
	RRs	45,4 a	15,8 a	29,5 a	16,4 a
	RsR	42,9 a	15,6 a	24,4 a	16,1 a
	sRR	45,6 a	15,6 a	29,7 a	16,4 a
	Rss	42,3 a	15,3 a	21,9 a	15,6 a
	ssR	45,1 a	15,6 a	30,9 a	16,7 a
	sRs	45,9 a	16,0 a	30,9 a	16,6 a
	sss	44,1 a	15,5 a	27,1 a	16,5 a
	rrr	45,4 a	16,0 a	27,0 a	17,7 a

Para cada año, en una misma columna, valores seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0,05$; Duncan).

En 1995 no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para el diámetro de la mazorca. Se encontraron diferencias entre tratamientos en el

número de filas por mazorca, el número de granos por fila y la longitud de mazorca. En 1996 no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para ninguno de los caracteres de mazorca anteriores.

4. CONCLUSIONES

La cantidad de agua de riego más lluvia recibida por el cultivo en el tratamiento RRR fue adecuada y el cultivo no sufrió déficit hídrico durante su crecimiento y desarrollo.

La considerable variabilidad de la profundidad del suelo en la parcela experimental ha contribuido a aumentar la variabilidad de la humedad disponible en el suelo y por tanto la variabilidad en distintos parámetros de crecimiento y en el rendimiento. Pese a ello, se han obtenido diferencias significativas en parámetros de crecimiento del cultivo y rendimiento en grano entre el riego completo o deficitario en las distintas fases.

Se ha encontrado una elevada variabilidad en los valores de agotamiento del agua del suelo. Se encontró extracción de agua hasta 90 cm de profundidad en los distintos tratamientos.

El crecimiento vegetativo no se vio significativamente afectado por los tratamientos de riego deficitario, excepto para el tratamiento más deficitario (sss). La altura de planta, fracción de PAR interceptado y área foliar no se redujeron significativamente hasta el momento de floración. Se observó un adelanto de senescencia foliar en los tratamientos de riego deficitario en la fase III. El menor valor del coeficiente de extinción de luz en los tratamientos de riego deficitario fue asociado a los mecanismos de enrollamiento foliar y a una disposición más erecta de las hojas.

La acumulación de materia seca aérea hasta el momento de floración no se vio significativamente afectada, excepto en el tratamiento sss. La producción final de materia seca se vio afectada significativamente por los tratamientos de riego y no hubo efecto del año del ensayo. El rendimiento en grano y el índice de cosecha se vieron afectados por los tratamientos de riego y además hubo efecto del año del ensayo. El rendimiento en grano y el índice de cosecha fueron significativamente

menores en 1995 que en 1996, debido a las diferencias en climatología entre los dos años.

El análisis de contrastes entre los tratamientos con riego completo (R) o riego deficitario (s) en las distintas fases ha mostrado que el rendimiento fue reducido por el riego deficitario en la fase II en ambos años y en la fase I en 1995. El índice de cosecha se redujo por el riego deficitario en la fase II ambos años. El efecto del riego deficitario en el rendimiento en grano se asoció a la reducción del número de granos m^{-2} (ambos años) y a un menor peso de grano (en 1995).

El déficit hídrico moderado producido por un espaciamiento entre riegos en la fase de floración o al final de la fase vegetativa ha producido descensos significativos en el rendimiento en grano. En general, la fase de floración (fase II) resultó la más sensible al déficit hídrico, con reducciones significativas del rendimiento, IC y componentes del rendimiento. El riego deficitario en la fase de llenado de grano (fase III) no causó reducciones significativas de materia seca aérea, rendimiento e IC. El riego deficitario en la fase III produjo una reducción significativa del peso del grano en 1995.

De los resultados de este trabajo se deduce que para las condiciones de alta demanda evaporativa del valle medio del Ebro y para un suelo de características similares a las de los ensayos, el riego deficitario en la fase vegetativa y especialmente en la fase de floración ocasiona reducciones importantes de rendimiento en el cultivo de maíz. Bajo condiciones limitantes de agua, la estrategia de riego deficitario en maíz no parece viable sin incurrir en descensos de producción.

Referencias

- Abrecht, D. G. y P. S. Carberry, 1993. The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield. *Field Crops Res.*, 31(1-2): 55-69.
- Begg, J. E., 1980. Morphological Adaptations of Leaves to Water Stress. En: *Adaptation of plants to water and high temperature stress*. N.C. Turner and P.J. Kramer (Eds.). Wiley, New York, USA, 33-42.

- Berenguer, M. J., 1996. Respuesta del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) a un suministro variable de riego en condiciones de campo y en ambientes controlados. Tesis Doctoral Universitat de Lleida, 462 pp.
- Clemmens, A. J. y A. R. Dedrick, 1994. Irrigation techniques and evaluations. En: Adv. series in agricultural sciences. K. K. Tanji and B. Yaron (Eds.). Springer-Verlag, Berlin, 64-103.
- Cramer, G. R., G. J. Alberico y C. Schmidt, 1994. Leaf expansion limits dry matter accumulation of salt stressed maize. Australian J. of Plant Physiol., 21 (5): 663-674.
- Denmead, O. T. y R. H. Shaw, 1960. The Effects of Soil Moisture Stress at Different Stages of Growth on the Development and Yield of Corn. Agron. J., 52: 272-274.
- Doorenbos, J. y A. H. Kassam, 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 33, Roma, 212 pp.
- Doorenbos, J. y W. O. Pruitt, 1977. Crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper 24. Roma, 144 pp.
- Eck, H. V., 1986. Effects of water deficits on yield, yield components, and water use efficiency of irrigated corn. Agron. J., 78: 1035-1040.
- Faci, J. M., A. Martínez-Cob, y A. Cabezas, 1994. Agroclimatología de los regadíos del bajo Gállego. Doce años de observaciones diarias en Montañana (Zaragoza). DGA Consejería de Agricultura, Ganadería y Montes, Zaragoza, 231 pp.
- Grant, R. F., B. S. Jackson, J. R. Kiniry y G. F. Arkin, 1989. Water Deficit Timing Effects on Yield Components in Maize. Agron. J., 81: 61-65
- Gordon, W. B., R. J. Raney y L.R. Stone, 1995. Irrigation management practices for corn production in North central Kansas. J. of Soil and Water Conservation., 50 (4): 395-399.
- Hanson, B., W. Bowers., B. Davidoff, A. Carvajal y W. Bendixen, 1995. Field performance of microirrigation systems. En: Proc., Fifth Int'l. Microirrigation

Congress. Microirrigation for a changing world: Conserving resources/ Preserving the environment. Orlando, Florida, USA, 986 pp.

Hsiao, T. C., E. Fereres, E. Acevedo y D.W. Henderson, 1976. Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. En: Water and plant life. Problems and modern approaches. O.L. Lange, L. Kappen and E. D. Schulze (Eds.). Springer Verlag, Berlin. Vol.19, 281-305.

Jensen, M. E., R. D. Burman y R.G. Allen, 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, Nº 70. American Society of Civil Engineers, New York, 332 pp.

Lamm, F. R., D. H. Rogers y H.L. Manges, 1994. Irrigation scheduling with planned soil water depletion. Trans. of the ASAE 37, 5: 1491-1497.

Martínez-Cob, A., J.M. Faci y A. Bercero. 1998. Evapotranspiración y necesidades de riego de los principales cultivos en las comarcas de Aragón. Institución Fernando el Católico, Zaragoza, 223 pp.

Muchow, R. C., 1989. Comparative productivity of maize, Sorghum and Pearl millet in a semi-arid tropical environment. II. Effect of water deficits. Field Crops Res., 20: 207-219.

NeSmith, D. S. y J. T. Ritchie, 1992a. Effects of soil water-deficits during tassel emergence on development and yield component of maize (*Zea mays* L.). Field Crops Res., 28 (3): 251-256.

NeSmith, D. S. y J. T. Ritchie, 1992b. Maize (*Zea mays* L.) response to a severe soil water-deficit during grain filling. Field Crops Res., 29 (1): 23-35.

Norman, J. M. y G. S. Campbell, 1991. Canopy structure. En: Plant Physiological Ecology. Pearcy *et al.* (Eds.). Chapman and Hall, London, UK, 301-325.

Otegui, M. E., F. H. Andrade y E.E. Suero, 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. Field Crops Res., 40: 87-94.

- Otegui, M. E. y R. Bonhomme, 1998. Grain yield components in maize. I. Ear growth and kernel set. *Field Crops Res.*, 56: 247-256
- Rhoads, F. M. y J. M. Bennet, 1990. Corn. En: *Irrigation of Agricultural Crops*. B. A. Stewart y D. R. Nielsen (Eds.). Agronomy Monograph Vol. 30. American Society of Agronomy. Madison, USA, 569-597.
- Richards, L. A., 1949. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Sci.*, 68: 95-112.
- Robins, J. S. y C. E. Domingo, 1953. Some Effects of Severe Soil Moisture Deficits at Specific Growth Stages in Corn. *Agron. J.*, 43: 618-621.
- SAS Institute Inc., 1996. *SAS/STAT Software: Changes and Enhancements through Release 6.11*, Cary, NC: SAS Institute Inc., 1104 pp.
- Scheierling, S.M, G.E. Cardon y R.A. Young, 1997. Impact of irrigation timing on simulated water-crop production functions. *Irrig. Sci.*, 18:23-31.
- Singh, B. R. y D. P. Singh, 1995. Agronomic and Physiological Responses Of Sorghum, Maize and Pearl Millet to Irrigation. *Field Crops Res.*, 42 (2-3): 57-67.
- Soil Survey Staff, 1992. *Keys to Soil Taxonomy*. SMSS Technical Monograph No. 19. Fith Edition. Pocahontas Press, Inc. Blacksburg, VA., 541 pp.
- Stegman, E.C., 1982. Corn grain yield as influenced by timing of evapotranspiration deficits. *Irrig. Sci.*, 3: 75-87.
- Struik, P. C., M. Doorgeest y J.G. Boonman, 1986. Environmental effects on flowering characteristics and kernel set of maize (*Zea mays* L.). *Netherlands J. of Agric. Sci.*, 34 (4): 469-484.
- Turner, N. C., 1986. Crop water deficits: a decade of progress. *Adv. in Agron.*, 39: 1-51.

CHAPTER 4

PARAMETRIZATION AND TESTING OF A CROP SIMULATION MODEL FOR MAIZE UNDER WATER LIMITING CONDITIONS

CHAPTER 4**PARAMETRIZATION AND TESTING OF A CROP SIMULATION MODEL FOR MAIZE UNDER WATER LIMITING CONDITIONS*****Abstract**

Water availability is the key factor determining maize yields in NE Spain. Irrigation is needed to obtain economic yields but it is costly and water supply is sometimes insufficient. The aim of this research was to test a simple simulation model for evaluating different irrigation strategies, especially under water-limited conditions. The LINTUL model was adapted and parameterized using experimental data from the 1995 season. Most parameters were obtained from experiments, although some were taken from the literature. This model is based on the concept of light use efficiency, incorporates a soil water balance and simulates phenology, crop leaf area, biomass accumulation and yield. It was tested on independent data from the 1995 and 1996 seasons under different irrigation treatments. The model predicted flowering date within ± 5 days of the observed values. Leaf area index was predicted satisfactorily, except under extreme water-stress conditions, where it was overestimated. In general, soil moisture content and yield (expressed as ear production) were accurately predicted. In the 1996 experiment measured yields ranged from 6.4 to 13.6 t ha⁻¹ and simulated yields from 6.5 to 12.2 t ha⁻¹. These results show that the LINTUL model can be used as a tool for exploring the consequences on maize yields of different irrigation strategies in NE Spain. Analysis of the model identified processes that strongly affects yield loss due to drought, but not included in the model. Among them the effects of drought on leaf senescence and on root development.

Key-words: maize, irrigation, water stress, simulation model.

* Submitted to European Journal of Agronomy

1. INTRODUCTION

Maize (*Zea mays* L.) is one of the major summer crops grown in the Mediterranean region. The scarce and highly variable precipitation in this region makes efficient planning of water use for irrigation necessary for most summer crops. Extensive research has been carried out on crop responses to water-limited conditions. Maize has been reported to be very sensitive to drought, particularly during flowering (Begg and Turner, 1976; Otegui *et al.*, 1995). NeSmith and Ritchie (1992a) reported yield reductions exceeding 90% caused by water-deficit during flowering in maize. The degree of yield reduction is determined by the timing, severity and duration of the water deficit (Hsiao, 1990). It is difficult to plan a deficit irrigation scheme for maize without causing yield reductions (Rhoads and Bennett, 1990; Lamm *et al.*, 1994).

To determine optimal irrigation strategies one could choose to do a large number of site-specific, long-term experiments. However, field experiments are time consuming and costly. Another option, therefore, is to integrate our present understanding of the processes responsible for crop response to water availability in crop simulation models. In this way the number of field experiments is reduced, while the model may be used in an exploratory manner to assess irrigation scenarios that can not be economically evaluated by experimentation and thus help improve irrigation management.

Several crop models have been developed for crop-water relationships differing in approach and detail (Jones *et al.*, 1986; Spitters and Schapendonk, 1990; Amir and Sinclair, 1991; Jefferies and Heilbronn, 1991; Muchow and Sinclair, 1991; Stockle *et al.*, 1994). The level of complexity required depends on the aims of the model. Simple models are often appropriate when aiming for yield prediction (Maas, 1993). Such simple models are more easily parameterized and often show a more robust behavior than complex models. In this paper complexity of the model is kept to a minimum and additional phenomena or processes were only incorporated if they were expected to improve the predictive ability of the model.

For this purpose, we have selected the generic crop growth model LINTUL, which calculates crop growth as the product of light interception and light use efficiency, and includes a water balance (Spitters and Schapendonk, 1990).

The objectives of this paper were to parameterize and test the LINTUL model, in order to develop a tool for exploring the consequences for maize yield of different irrigation strategies in the dry conditions of the Ebro Valley in Northeast Spain. For model parameterization and testing, we carried out field experiments in the region, in which drought was imposed at various times and various severities.

2. FIELD EXPERIMENTS

Three experiments (Table 4.1) were conducted in Zaragoza, Northeast Spain (latitude 41° 43' N, longitude 0° 49' W, altitude 225 m) during the growing seasons of 1995 and 1996, to study the response of maize (cv. Prisma 700) to water deficits. The soil, developed from alluvial deposits, was classified as *Typic Xerofluvent*. The depth that may be rooted is determined by a gravel layer occurring between 1.0 and 1.7 m. The texture is sandy loam in the 0.0 m to 0.5 m top soil and loam to sandy loam below. The volumetric moisture content at field capacity (-0.03 MPa) and permanent wilting point (-1.5 MPa) in each 0.3 m layer to 0.9 m depth were measured using pressure plates (Richards, 1949). The values of field capacity and wilting point hardly differed in the three measured layers in the 0-0.9 m soil profile, and were averaged as 27% and 9%, respectively.

Soil water content was monitored gravimetrically and/or by neutron probe in each 0.2 or 0.3 m layer down to 1 to 1.2 m depth during the growing season. The average moisture content of the profile used for comparison with the model was calculated from the soil water contents in each layer up to 0.9 m depth, taking into account the layer thickness. Experimental details are given in Table 4.1. Crop development was recorded from emergence to physiological maturity. Plant height and the fraction of photosynthetically active radiation (PAR) intercepted by the crop were measured at one- to two-week interval. Intercepted PAR (IPAR) was calculated from PAR values that were measured below and above the crop canopy with a portable tube solarimeter (Ceptometer Dekagon, Pullman, WA, U.S.A). To eliminate the effect of solar altitude on the interception values the

measurements were taken at noon on cloudless days. Leaf area index (LAI) and specific leaf area (SLA) were measured at flowering. Shoot biomass and its partitioning among the different plant organs was determined biweekly by harvesting 0.5 m² from each plot. At physiological maturity, total above ground biomass and grain yield was obtained.

Table 4.1. Type and date of measurements in the experiments used in the parameterization and testing of the LINTUL model. Dates of measurements are expressed in day of the year (DOY). CS=Continuous Stress experiment; PHS= Phases Stress experiment. The different irrigation treatments and other variables are indicated with codes that are explained in the text.

	Experiment		
	PHS-95	PHS-96	CS-95
Crop emergence (DOY)	145	145	146
Plant density (pl m ⁻²)	8.2	8.0	8.2
Row spacing (m)	0.75	0.75	0.75
Harvest date (DOY)	278	290	275
Irrigation treatments	III, Is'I, Isl, sII, Iss, ssl, sls, sss, rrr	III, IIs, Isl, sII, Iss, ssl, sls, sss, rrr	T-1, T-2, T-3, T-4, T-5, T-6
Dates of measurements (DOY)			
Soil Water Content (m ³ m ⁻³)	143, 198, 230, 277	144, 200, 215, 291	143, 270
Plant Height (m)	156, 168, 174, 186, 195, 205, 214, 241	169, 172, 185, 191, 200, 211, 225, 241	167, 179, 193, 201, 213, 241
IPAR (MJ m ⁻²)	174, 180, 193, 202, 214, 241	157, 164, 172, 183, 194, 212, 226, 242	174, 192, 202, 214, 244
LAI (m ² m ⁻²)	215 (silking)	211 (tasseling)	216 (silking)
SLA (m ² leaf g ⁻¹)	215 (silking)	211 (tasseling)	216 (silking)
Shoot biomass (g m ⁻²)	172, 182, 199, 216, 233, 278	211 (tasseling)	184, 216, 236
EC _s (dS m ⁻¹)	278	292	178, 193, 207, 221, 236, 249, 276

Electrical conductivity of 1:5 soil-water extracts (EC_s) was measured to assess possible salinity problems during the experimental period. Cultural

practices comprise high-input conditions to avoid nutritional limitations. Weeds, insects and diseases were controlled according to common practices in the area.

Irrigation scheduling for the well-irrigated treatments was calculated from the reference evapotranspiration (ET_0) measured in a weighing lysimeter located nearby multiplied with a time-dependent crop coefficient (Doorenbos and Pruitt, 1977). Rainfall during the growing season was 35 mm in 1995 and 103 mm in 1996, which represents 5% and 16% of the total crop water requirements, respectively.

Water stress during different growth phases (Phases Stress experiments = PHS)

Field experiments were carried out in 1995 and 1996 to study the effects of a moderate water stress at different stages of crop development in maize.

The growing season was divided into 3 phases: Phase 1, from emergence to the end of the vegetative period; Phase 2, from the end of the vegetative period to milk stage; and Phase 3, from milk stage to physiological maturity. In each of the phases either irrigation to meet the potential evapotranspiration of the crop (I) or about one third of this amount (s) was supplied. All possible combinations of these treatments were applied (III, IIs, IsI, sII, Iss, sSI, sIs, sss). In addition an intermediate treatment (rrr), consisting of half of the water used in the well-irrigated treatment, was applied. The timing of irrigation in the well-irrigated treatment was based on the common irrigation practices in the area. These practices include flooded irrigation at 10-14 days interval with doses ranging from 60 to 100 mm. The experimental design was a randomized block, with 9 treatments and 3 blocks.

Ridges delimited plots of 50 m². Irrigation was applied from 200 mm diameter gated pipes with a total discharge in each plot of 3.4 l s⁻¹. Total water applied at each irrigation was measured with a volumetric flow meter. The depth of water applied in each irrigation varied from 32,0 to 79,3 mm. The III treatment received a total of 9 and 8 irrigations during the growing season in 1995 and 1996, respectively. The rest of the treatments received between 3 and 7 irrigations (Table 4.2).

Table 4.2. Irrigation dates (day of the year, DOY) and amount of water applied (mm) in the different irrigation treatments in the phases stress experiments in 1995 (PHS-95) and 1996 (PHS-96).

PHS-95 experiment										
Treatment	Phase 1			Phase 2			Phase 3			Total
DOY	165	177	188	199	209	218	234	248	262	
III	79.3	65.2	60.7	60.2	65.0	65.0	60.0	57.4	55.6	568.4
Is'I'	79.3	65.2	60.7	60.2			60.0	57.4	55.6	438.4
Isl	79.3	65.2	60.7		52.0		60.0	57.4	55.6	430.2
sII		65.2		60.2	65.0	65.0	60.0	57.4	55.6	428.4
Iss	79.3	65.2	60.7		52.0			57.4		314.6
ssl		65.2			52.0		60.0	57.4	55.6	290.2
sls		65.2		60.2	65.0	65.0		57.4		312.8
sss		65.2			52.0			57.4		174.6
rrr	79.3		60.7		65.0		60.0		55.6	320.6

PHS-96 experiment										
Treatment	Phase 1			Phase 2		Phase 3			Total	
DOY	159	180	192	204	218	229	243	257		
III	63.3	58.4	69.7	70.7	66.0	55.2	59.7	62.4	505.3	
IIs	63.3	58.4	69.7	70.7	66.0		59.7		387.8	
Isl	63.3	58.4	69.7		32.0	55.2	59.7	62.4	400.6	
sII		58.4		70.7	66.0	55.2	59.7	62.4	372.2	
Iss	63.3	58.4	69.7		32.0		59.7		283.1	
ssl		58.4			32.0	55.2	59.7	62.4	267.5	
sls		58.4		70.7	66.0		59.7		254.7	
sss		58.4			32.0		59.7		150.0	
rrr	63.3		69.7		66.0		59.7		258.7	

¹In 1995 two treatments were subjected to deficit irrigation in Phase 2: the Isl received one irrigation in the middle of Phase 2, whereas the Is'I' treatment received one irrigation at the beginning of Phase 2.

Continuous water stress experiments (Continuous Stress experiment = CS).

In 1995 the sprinkler line-source technique (Hanks *et al.*, 1976) was used to study the effects of a continuous water stress in maize. The sprinkler line-source

provided adequate water near the sprinkler line throughout the growing season while applying a decreasing quantity of water with increasing distance perpendicular to the line-source. To define different irrigation treatments the gradient of water applied was divided in 6 parts (T1-T6). Water stress developed progressively during the growing season in the 5 suboptimal irrigation treatments (T2-T6). Irrigation was applied every 2 to 4 days to meet the potential evapotranspiration demand of a maize crop at the rows nearest to the line source (T1). Catchment cans installed across the field at a spacing of 2.25 m were read after each irrigation. The degree of deficit irrigation for each treatment can be inferred from Fig. 4.1, which shows the amount of water applied to the different treatments during the growing season. A total of 27 irrigations were applied during the irrigation season. The total seasonal amount of water applied in T-1 was 551.2 mm.

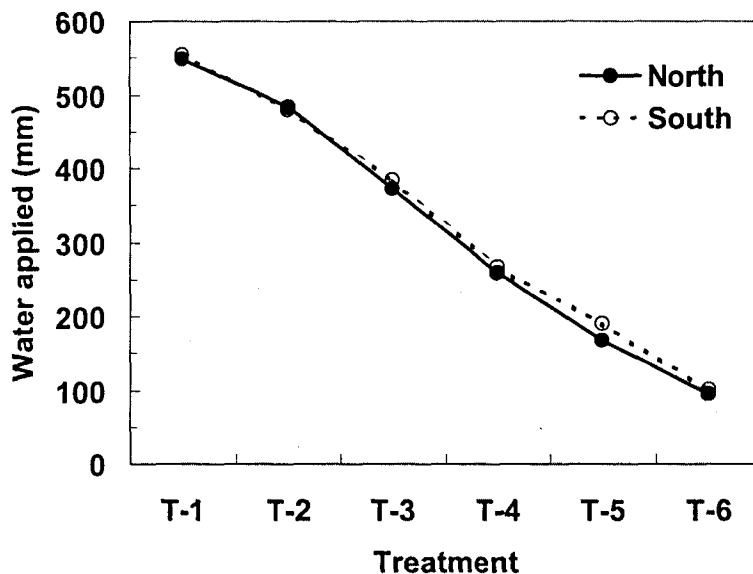


Fig. 4.1. Total amount of water applied by the sprinkler line-source to its north side and south side in all the treatments, in the CS-95 experiment.

3. MODEL DESCRIPTION

The original version of the LINTUL model was described by Spitters and Schapendonk (1990). LINTUL is based on the fact that crop growth rate under favorable conditions is proportional to the amount of light intercepted by the

canopy (Monteith, 1977). The model is implemented in the Fortran Simulation Translator, FST (Rappoldt and Van Kraalingen, 1996). Simulations run at a time step of one day, starting at the day of crop emergence. A code listing is available upon request from the authors of the model.

Required inputs for the model include daily weather data (maximum and minimum temperature, global radiation, rain, vapor pressure and wind speed), crop management data (plant density and day of emergence), crop parameters, the soil moisture retention characteristics (soil water content at saturation, field capacity, wilting point and air dryness) and the initial soil water content.

The model consists of two major parts, the plant growth component and the soil water component, which may induce a reduction in growth rate.

3.1. Crop growth under optimal water supply

The dry weights of the different plant organs (leaves, stems, roots and grains) are the state variables in the crop growth model and are obtained by integration of their growth rates over time. The daily crop biomass increment is calculated as the product of the amount of IPAR by the crop and the light use efficiency (LUE). In the absence of drought, LUE is constant. Light interception by the crop is modelled as a function of its LAI and a constant light extinction coefficient (K), using Beer's law. During the early stages of growth, leaf area increases exponentially as a function of temperature. In later stages, leaf area growth is calculated as the increase in leaf weight times a constant specific leaf area, accounting for leaf senescence due to ageing and self-shading. The dry matter produced is partitioned among the various plant organs, using partitioning factors defined as a measured function of the thermal time. For example, grain yield is calculated as total dry matter growth multiplied with the thermal-time dependant fraction of dry matter allocated to the storage organs.

3.2. Effects of drought on crop growth

In the model, water-limiting conditions have two effects on the crop: reduction of growth rate and change in allocation pattern. Crop growth is reduced proportionally with the ratio of actual to potential transpiration. The critical soil

water content below which transpiration rate is reduced below its potential value depends on crop sensitivity to drought and the evaporative demand of the atmosphere (Driessen, 1986). Dry matter partitioning changes in favour of root growth during the vegetative phase (Munns and Pearson, 1974) when the ratio of actual to potential transpiration falls below 0.5 (Van Keulen *et al.*, 1981). No effects of drought on crop morphology (K, SLA) and leaf senescence are assumed in the model.

3.3. Soil water balance

Soil water balance is calculated using one soil layer, which increases in thickness depending on root depth (Van Keulen, 1986). Root growth causes exploration of the water in depth, until the maximum rooting depth or soil depth is reached. Newly explored soil depth is assumed to be at field capacity initially. The daily change in soil moisture content in the rooting zone is calculated as the net result of water gain from irrigation and rainfall, minus water loss by crop transpiration, soil evaporation, runoff and deep percolation. Daily values of irrigation and rainfall are inputs needed in the model. Percolation is calculated as the amount of water in excess of field capacity that drains below the root zone. Runoff occurs if maximum drainage capacity is exceeded.

Potential evapotranspiration is calculated with the Penman equation (Penman, 1948). Potential transpiration is a fraction of this rate, equal to fractional light interception calculated using Beer's law. The ratio of maize transpiration to Penman transpiration is introduced in the model to obtain the potential maize transpiration. This ratio ranges from 1.0 to 1.2 depending on ground cover (Doorenbos and Pruitt, 1977). Actual transpiration rate is calculated from its potential value and the soil water status. Actual evaporation is calculated from its potential value, the soil water status and an additional exponential decrease after days without rain or irrigation. The exponential decrease is a simplified implementation of Ritchie's concept of evaporation reduction proportional to the square root of the number of days since the last rainfall with a fixed wet stage of one day (Ritchie, 1972).

4. MODEL PARAMETERIZATION

A part of the experimental data was used for parameterization of the model, whereas another independent portion of the data was reserved to test the model. Experiment PHS-95 was chosen for model parameterization because it had a high frequency of detailed field measurements. Values that could not be obtained from this experiment were taken from the literature. A list of the crop and soil parameters, with their values is given in Table 4.3.

Table 4.3. Crop and soil parameters used in the study

Symbol	Parameter	Unit	Value	Source
Crop parameters				
K	Light Extinction Coefficient	-	0.6	Boons-Prins <i>et al.</i> , 1994
LUE	Light Use Efficiency	g DM MJ ⁻¹ PAR	4.6	Exp. PHS-95
SLA	Specific Leaf Area	m ² g ⁻¹	0.016	Exp. PHS-95
Tbase	Base temperature	° C	8	Warrington & Kanemasu, 1983
Tsum1	T sum from emergence to anthesis (Tbase = 8 ° C)	° C d	1000	Exp. PHS-95
Tsum2	T sum from emergence to maturity (Tbase = 8 ° C)	° C d	1750	Exp. PHS-95
ROOTDM	Maximum root depth	m	0.9	Exp. PHS-95
TRANSC	Transpiration constant (drought tolerance level)	mm	1.8	Driessen, 1986
Soil parameters				
WCST	Water content at full saturation	m ³ m ⁻³	0.45	Exp. PHS-95
WCFC	Water content at field capacity (-0.03 MPa)	m ³ m ⁻³	0.27	Exp. PHS-95
WCWP	Water content at wilting point (-1.5 MPa)	m ³ m ⁻³	0.09	Exp. PHS-95
WCAD	Water content at air dryness	m ³ m ⁻³	0.03	Exp. PHS-95

4.1. Crop parameters

Light extinction coefficient. Extensive measurements on spring wheat cv. Yecora 700 (Robertson and Giunta, 1994), had revealed no effects of drought on the light extinction coefficient. In the model, K was assumed to be constant throughout the growing season, with a value of 0.6 (Boons-Prins *et al.*, 1994). This value applies to global total daily light interception and is an average over the whole photoperiod. In our own experiments light extinction was only measured at noon, when K has the lowest value of the day, and at anthesis (k-fully irrigated: 0.5; k-deficit irrigation: 0.2 to 0.3). This reveals a significant relative difference between drought treatments. Extensive measurements (diurnal and over the season) would be needed to allow a parameterization of the effect of drought on K .

Light Use Efficiency. LUE was obtained by simple linear regression of total crop biomass, measured at different times in the season, and cumulative light interception, in the well-irrigated treatment. Total crop biomass was computed as the sum of measured above ground biomass and estimated root biomass. Root biomass was estimated using the observation that the ratio of root growth to total growth decreases from 0.5 to zero from emergence to anthesis (Penning de Vries *et al.*, 1989).

Daily total incident PAR was multiplied by the fraction of light that was intercepted (values between measurements were linearly interpolated) to obtain the daily IPAR by the crop. The sum of these daily values gave the total cumulative IPAR by the crop. LUE was then calculated as the slope of the regression line of cumulative total crop biomass on cumulative IPAR (Fig. 4.2). The regression line was forced through the origin, because of the assumed direct proportionality of light interception and growth. Post-anthesis harvests were excluded because of unmeasured weight loss due to fallen leaves. A value of LUE of 4.6 g DM/MJ IPAR was obtained. A similar value (4.5) has been found by Cabelguenne *et al.* (1990) in southern France. Lower values have been reported for maize in different experiments (3.5 g MJ⁻¹: Maas, 1993; 4.0 g MJ⁻¹: Stockle *et al.*, 1994) but these values refer only to above ground biomass. Values

obtained in the literature agree well with the value of 3.8 g MJ^{-1} found in our experiment when only above ground biomass was considered (Fig. 4.2).

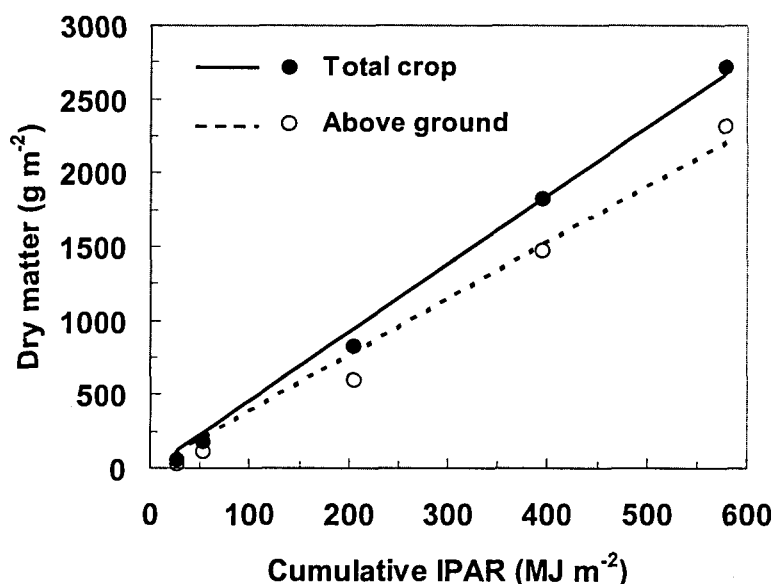


Fig. 4.2. Relationship between cumulative dry matter (total crop biomass and above-ground biomass) and cumulative intercepted PAR (IPAR) by the crop, in the well-irrigated treatment in the PHS-95 experiment. Lines represent fitted linear regressions forced through the origin. $y = 4.61 x$, $R^2 = 0.995$ (—); $y = 3.82 x$, $R^2 = 0.984$ (.....).

Dry matter partitioning. Partitioning of the daily increment of dry matter among leaves, stems, roots and storage organs (ear) was related to thermal time (Fig. 4.3). Thermal time was calculated (Table 4.3) with a base temperature of 8°C (Warrington & Kanemasu, 1983; Cabelguenne *et al.*, 1990). Roots were not measured in the field experiment. Partitioning between shoot and root was therefore, assumed to be similar to earlier reports (Penning de Vries *et al.*, 1989; Boons-Prins *et al.*, 1994). The pattern of allocation to leaves, stems and storage organs was derived as the fraction of new above-ground biomass production allocated to the different plant organs between two subsequent harvests (Fig. 4.3). This above-ground allocation pattern hardly varied among treatments. Decreases

in leaf and stem weight at late growth stages due to senescence and translocation were assumed to indicate that no more biomass was allocated to these organs.

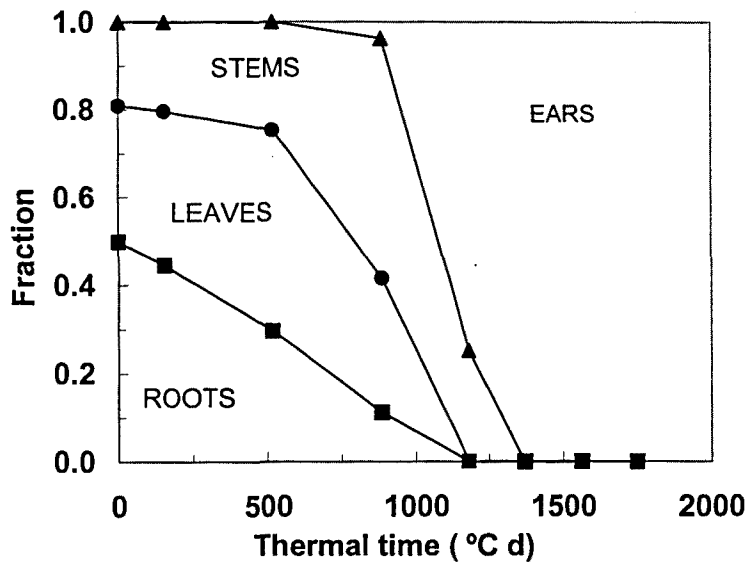


Fig. 4.3. Fraction of the new daily dry matter production partitioned to the different plant organs (roots, leaves, stems and ears) as a function of thermal time, in the well-irrigated treatment in the PHS-95 experiment. The fraction leaves includes blade plus sheath.

Specific leaf area. The value of SLA increases with age, but drought may reduce its value (Ludlow, 1975). However, Habekotté (1997), working with oilseed rape, found that including the dynamics of SLA in a crop model did not improve the simulation of dry matter in comparison with using an average value of SLA. Therefore, a constant value of $0.016 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, measured at anthesis in the well-irrigated treatment, was used in the model. The same value has been reported for maize (Sibma, 1987). No effect of water stress on SLA is considered in the model.

Leaf senescence. Water stress can accelerate leaf senescence (NeSmith and Ritchie, 1992b). However, lack of quantitative data in the experiments on leaf senescence did not allow us to establish a relationship between leaf senescence and irrigation treatment. In the model leaf senescence occurs due to ageing

(through temperature and thermal time) and due to shading (through LAI), but the effect of water stress on leaf senescence is not considered.

4.2. Soil parameters

Soil water content at field capacity ($0.27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) and wilting point ($0.09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) were obtained using pressure plates (Richards, 1949). Soil water content at saturation ($0.45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) was estimated from porosity measurements and at air dryness ($0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) as one third of wilting point.

4.3. Evaluation of the model parameterization.

The parameterization was checked first by running the model for the conditions of the PHS-95 experiment. The calculated LAI satisfactorily matched the measured values from the experiment for different treatments except for the treatment subjected to deficit irrigation during all of the three developmental phases (sss), where LAI was overestimated (Fig. 4.4). Fig. 4.5 shows the measured and simulated soil water content of the total profile for the treatments III, rrr and sss at several dates during the crop season. Soil water content was accurately simulated at the end of the crop season. Throughout the season the predicted soil water content did not exactly match the measured values from the experiment, but it did follow the general trend of data.

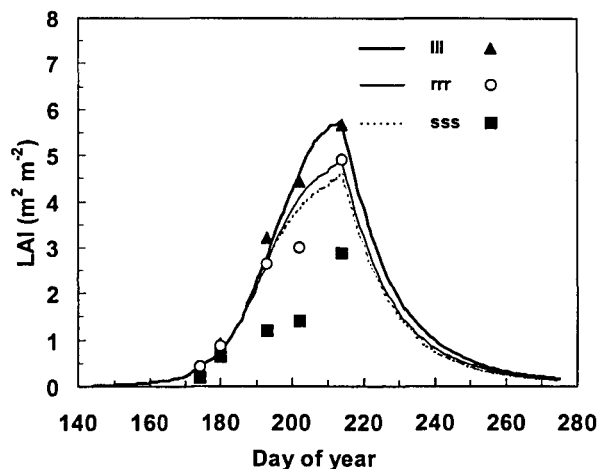


Fig. 4.4. Measured (symbols) and calculated (lines) leaf area index (LAI) values in treatments III, rrr and sss of the PHS-95 experiment.

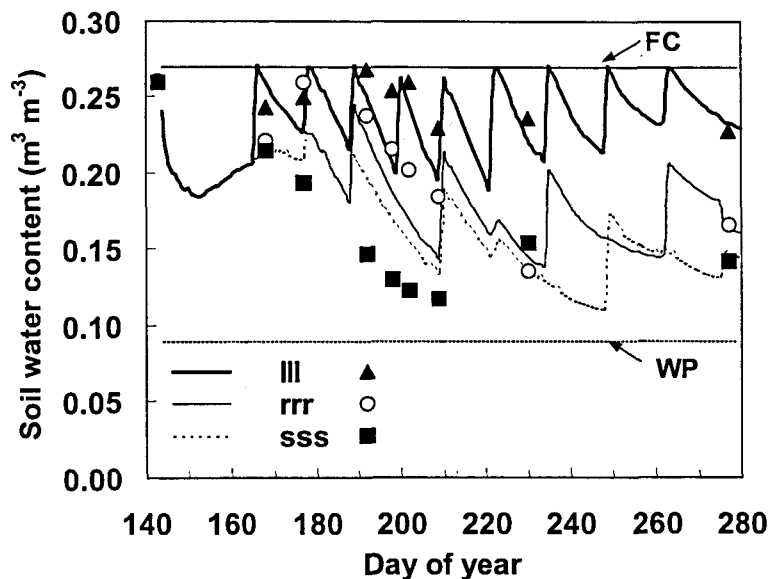


Fig. 4.5. Measured (symbols) and calculated (lines) volumetric soil water content in the 0-0.9 m soil profile in treatments III, rrr and sss of the PHS-95 experiment. Horizontal lines represent soil water content at field capacity (FC) and wilting point (WP).

Fig. 4.6 shows the measured and calculated above-ground biomass at anthesis (Fig. 4.6a) and yield (ears) at maturity (Fig. 4.6b) for all the treatments of the PHS-95 experiment. The model correctly showed the trend of yield reduction under a decreasing amount of irrigation applied. In general, good agreement was observed between measured and calculated yields, differing on average by 23 %. In six out of nine treatments the differences between the calculated and the observed values were within 5 %, but deviations for the remaining three treatments (sss, ls'l and lss) amounted to 60 % and were significant. Measured yields had a high variability among replicates. These comparisons provide some information about the reasonableness of the model structure. It is however, not an independent model test. Testing of the model on independent data is described in the next section.

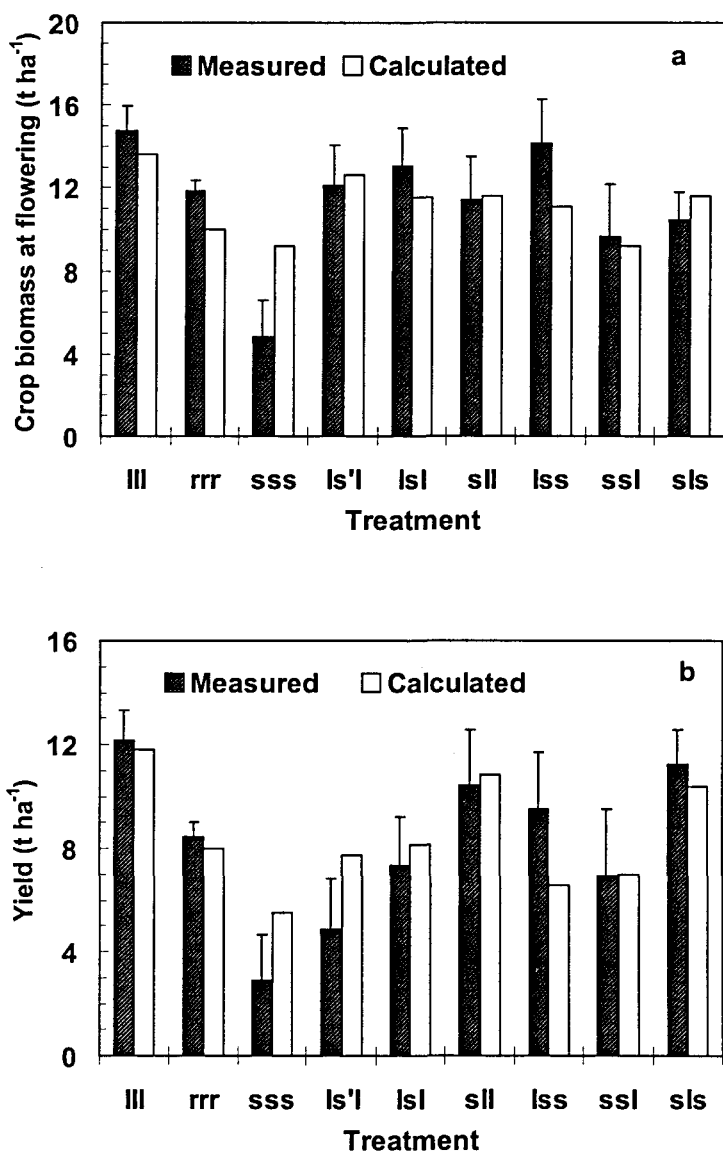


Fig. 4.6. Measured and calculated above ground biomass at flowering (a) and final yield (b) in all treatments of the PHS-95 experiment. Yield (oven dried weight) is expressed as the whole ear (grain + cob). For treatment details see text. Vertical lines represent the standard errors of the mean (SE).

5. MODEL TESTING

After model parameterization, the model was tested against independent data from the CS-95 and PHS-96 experiments (Table 4.1). The model was tested with respect to: date of flowering, leaf area index, soil water content, crop biomass and yield.

The date of flowering was simulated within 2 days of the observed dates in the well-irrigated treatments. In the water-deficit treatments, flowering was delayed between 2 and 5 days compared with the model results. This delay was not predicted by the model, because it assumes phenology to be only dependent on thermal time, so effects of water stress on phenology are not taken into account. However, in maize, water deficit can delay anthesis and physiological maturity. NeSmith and Ritchie (1992a) reported a delay in anthesis of up to 15 days in maize grown under water-limited conditions.

Fig. 4.7 shows simulated LAI and LAI estimated from IPAR measurements in the PHS-96 experiment, for the III, rrr and sss treatments. Up to 45 days after sowing (day of year (DOY), 183), LAI was simulated well for all the treatments, and for the rest of the season it was simulated satisfactorily in the well-irrigated treatments. In the deficit irrigation treatments, increased leaf senescence as a result of water stress caused LAI to decrease. Since the model does not account for the effect of water deficit on leaf senescence, LAI from 45 days after sowing was overpredicted. In the CS-95 experiment, the LAI was also overestimated for all the suboptimal irrigation treatments (T-2 to T-6; data not shown).

Measured and simulated soil water content at different dates were compared for the treatments III, rrr and sss in the PHS-96 experiment (Fig. 4.8). The total soil water content was accurately simulated at two dates around anthesis. At the final harvest simulated soil water content was overestimated by $0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ on average in the three treatments, indicating that water uptake by the crop was slightly underpredicted during the later stages of crop growth. Apart from this reservation, the model captures the essential response of the soil water balance during crop growth over a range of irrigation treatments.

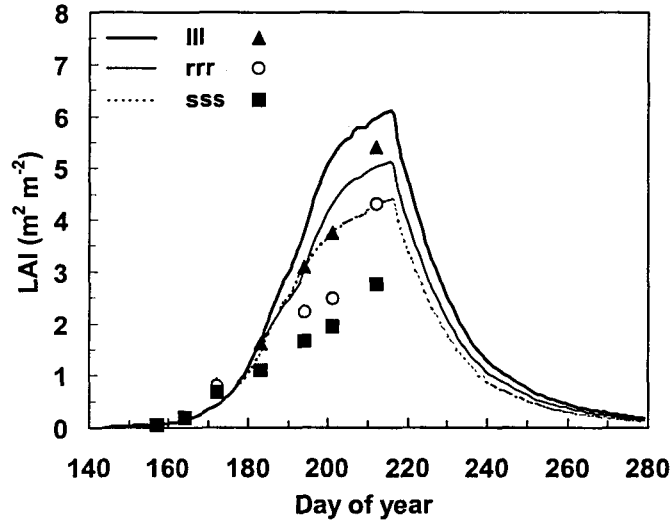


Fig. 4.7. Measured (symbols) and simulated (lines) leaf area index (LAI) in treatments III, rrr and sss of the PHS-96 experiment for model testing.

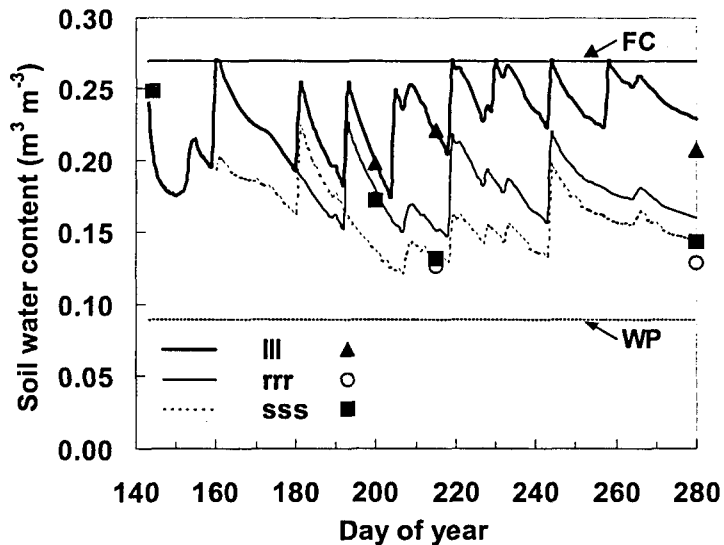


Fig. 4.8. Measured (lines) and simulated (symbols) volumetric soil water content in the 0-0.9 m profile depth in treatments III, rrr and sss of the PHS-96 experiment for model testing. Horizontal lines represent soil water content at field capacity (FC) and wilting point (WP).

Measured and simulated yields (ears) and dry matter at maturity were compared for all the irrigation treatments of the PHS-96 and CS-95 experiments. The model correctly showed the trend of yield reduction under decreasing irrigation amounts. In the PHS-96 experiment, measured yields ranged from 6.4 to 13.6 t ha⁻¹ and simulated yields from 6.5 to 12.2 t ha⁻¹ in the different irrigation treatments (Fig. 4.9). Mean measured and simulated yields were 10.4 and 9.7 t ha⁻¹, respectively. Lowest yields were obtained in the sss treatment, both measured (6.4 t ha⁻¹) and simulated (6.5 t ha⁻¹).

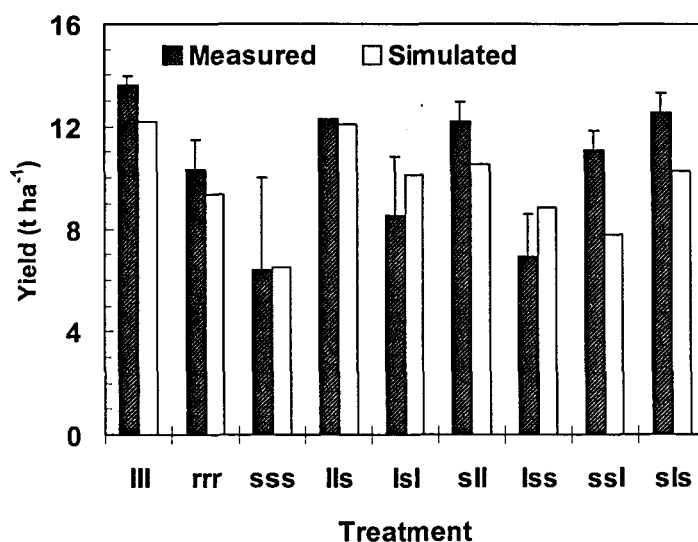


Fig. 4.9. Measured and simulated yields in all treatments of the PHS-96 experiment for model testing. Yield (oven dried weight) is expressed as the whole ear (grain + cob). For treatment details see text. Vertical lines represent the standard errors of the mean (SE).

Actual and simulated above-ground biomass had a similar relative magnitude of variation (data not shown). The model accurately estimated yields for the treatments subjected to: full irrigation (III), moderate water deficit (rrr) and severe water deficit (sss) during the three phases of the growing season (measured and simulated differing by 7 %). However, grain yield was overestimated (measured and simulated differing by 25%) for the treatments subjected to deficit-irrigation during the flowering phase. In contrast, in the

treatments with limited-irrigation during the vegetative phase, grain yield was underestimated (measured and simulated differing by 21%), irrespective of the amount of irrigation received at later stages.

In the CS-95 experiment (Fig. 4.10) the model correctly simulated the observed trend of yield reduction under the gradient of water applied, but the simulated decrease in yield was less pronounced than observed. Measured yields decreased from 13.6 t ha⁻¹ in the well-irrigated treatment (T1) to almost none (0.1 t ha⁻¹) in the least irrigated treatment (T6). The model predicted a range of yields from 12.3 to 2.5 t ha⁻¹ for T1 to T6. The important yield reduction can be partly explained by the combined effects of a shallow rooting pattern, high soil evaporation losses due to the high frequency irrigation and salinity on the crop in the line-source sprinkler experiment. The effects of salt stress and shallow rooting system are not included in the model.

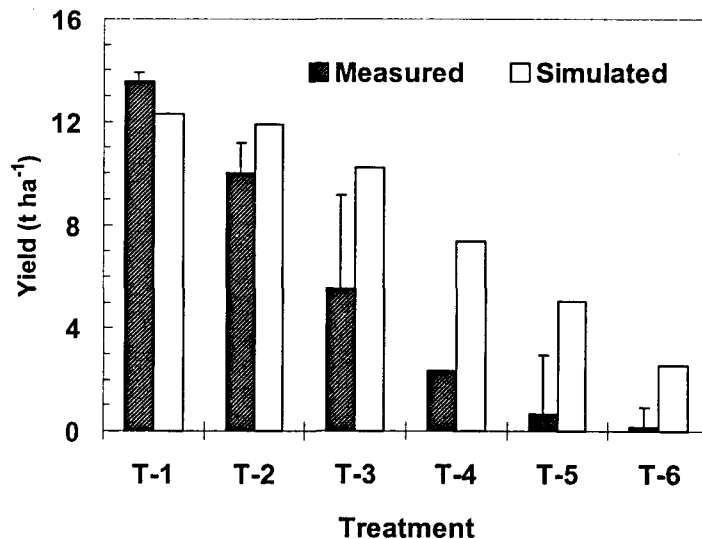


Fig. 4.10. Measured and simulated yields in all treatments of the CS-95 experiment for model testing. Yield (oven dried weight) is expressed as the whole ear (grain + cob). For treatment details see text. Vertical lines represent the standard errors of the mean (SE).

6. SENSITIVITY ANALYSIS

An analysis of the sensitivity of the simulated yield (ears) to +10% changes in the input parameters LUE, K, SLA, TRANSC (level of drought tolerance by the crop), Root partitioning (fraction of the dry-matter partitioned to the roots as a function of thermal time) and leaf senescence (rate of leaf senescence) was performed using a simulated maize crop grown at Zaragoza at 8.2 pl m².

Four scenarios were evaluated, determined by the combination of two different soil types (sandy and clay soils) and two irrigation strategies (full irrigation and deficit irrigation). The full irrigation treatment consisted of applying irrigation amounts of 40 mm at weekly intervals, providing a total amount of water (640 mm) equivalent to the crop evapotranspiration (ET_c). The deficit irrigation treatment received irrigation amounts of 40 mm at 14 day intervals, providing a total amount of water equivalent to half of the ET_c . The weather conditions of 1995 were used, together with an initial soil moisture content equivalent to field capacity. These scenarios provided a range of crop exposures to water deficit.

Sensitivity analysis indicates how strongly the parameters affect the model results and also the degree of accuracy to which the tested parameters must be known. Sensitivity coefficients (SC) are calculated as:

$$SC = (\text{increment Yield/Yield}) / (\text{increment Parameter/Parameter}).$$
 I.e. $|SC| > 1$ indicates that the percentage change in yield is greater than the percentage change in the input parameter.

Maize ear yield proved more than proportionately sensitive (Sensitivity coefficient $|SC| > 1$) in all scenarios to change in LUE (Table 4.4). Sensitivity was also high but to a lesser degree, to leaf senescence and K. In contrast, sensitivity of yield to change in SLA, TRANSC and Root partitioning was low ($|SC| < 0.5$) in all scenarios. Acceleration of leaf senescence resulted in a decrease in yield (SC negative) in all scenarios. The results indicate that the values of the LUE, K and leaf senescence rate should be accurately known, especially for limited irrigation conditions.

Table 4.4. Sensitivity coefficients (SC) for the model ear yield (Y) in 2 irrigation scenarios and 2 soil types for changes of +10% in several crop parameters (P). Parameters: light use efficiency (LUE), light extinction coefficient (K), specific leaf area (SLA), level of drought tolerance of the crop (TRANSC), fraction of the dry-matter partitioning to the roots as a function of thermal time (Root partitioning); Leaf senescence (rate of leaf senescence).

Soil Irrigation	SC = ($\Delta Y/Y$) / ($\Delta P/P$)			
	Sandy		Clay	
	100 % ETc ¹	50 % ETc ²	100 % ETc ¹	50 % ETc ²
Reference simulated ear yield with no change in the parameters (t ha ⁻¹)	11.3	6.7	12.0	8.4
Parameters				
LUE	1.24	1.52	1.42	1.32
K	0.51	0.88	0.65	0.67
SLA	0.22	0.48	0.38	0.29
TRANSC	-0.10	0.10	0.03	0.12
Root partitioning	-0.16	-0.01	0.00	0.00
Leaf senescence	-1.00	-0.91	-0.96	-0.88

¹ 16 irrigations of 40 mm (total irrigation amount equivalent to ETc).

² 8 irrigations of 40 mm (total irrigation amount equivalent to half of ETc).

7. DISCUSSION AND CONCLUDING REMARKS

The results of this study reveal that the adapted LINTUL model gives satisfactory predictions of phenology, growth and yield for maize under different water conditions. The model simulates satisfactorily the time course of LAI under well-irrigated conditions, but overestimates it under water stress conditions. This suggests a need for studies aimed to quantifying the extent to which water stress accelerates leaf senescence and its effects on other processes.

In the PHS-96 experiment, ear yield was generally properly simulated, apart from an overestimation in the treatments with deficit irrigation during the flowering phase. This may be due to a particular sensitivity of maize to water stress during flowering. A number of studies indicate that anthesis may be a critical period for

yield determination in maize (NeSmith and Ritchie, 1992a). Depending on the timing and intensity of drought, yield may be reduced due to desynchronization of tasseling and silking, leading to impeded grain setting and kernel abortion (Struik *et al.*, 86). Conditioning of plants to a moderate water stress could be responsible for the yield underestimation in the treatments with deficit irrigation during the vegetative phase. In the PHS-96 experiment, limited irrigation during the vegetative phase consisted mainly of a delay in the first irrigation. The delay in the first irrigation could have enhanced root growth in early stages and caused a better conditioning to withstand subsequent water stress. Boyer and McPherson (1976) observed that maize grown under a non-severe water stress during the vegetative period, more efficiently withstood subsequent drought during the reproductive period.

A good agreement was found between simulated and observed ear yield for the well-irrigated treatment (T-1) in the CS-95 experiment. The general yield overestimation for all the suboptimal irrigation treatments (T-2 to T-6) can be partly explained from the combined effects of a shallow rooting system and salinity in the experiments (not accounted for in the model). Data on soil water extraction during the growing season in the CS-95 experiment showed that 70 % of the plant water uptake took place from the 0.5 m top soil, 25 % from the 0.5-0.7 m depth and only 5% was extracted from the 0.7-1.0 m depth. Even in the less irrigated treatments the crop failed to extract water from deeper soil layers. In the model, only one soil layer is considered and the maximum rooting depth is reached in all the treatments and only the total root biomass differs depending on the severity and timing of the water stress. The same rootable zone is used in the water balance for all treatments. It seems that the amount of water available to the crop was overestimated in the sprinkler irrigation experiment and therefore the effects on crop growth and yield were underestimated.

In the CS-95 experiment, the salinity level found in the top 0.3 m at crop emergence was below the maize threshold for salinity (Rhoades *et al.*, 1992). However, the salinity level increased progressively both across the water gradient and in time. At harvest, the soil salinity level was found to be above the crop threshold in the water stressed treatments, and thus salt stress together with the

water stress can be assumed to have occurred. In these treatments irrigation was insufficient to meet the crop water requirements and to leach away soluble salts and therefore salts concentrated in the soil causing a salt stress as well as water stress in the plants. The effects of salinity on plant growth may have resulted in a reduction in the availability of water by lowering the osmotic potential (Fitter and Hay, 1987). Since the model does not simulate salinity effects, this explains the lower measured yields as compared with the simulated yields in the water-stressed treatments.

The model has helped identifying key processes in the response of maize to deficit irrigation strategies. Of major importance are the effects of drought on canopy architecture and leaf senescence. The model does not simulate drought effects on root patterns, affecting water extraction. We conclude that the simple model gives satisfactory results considering its objectives and may be used for preliminary exploration of the consequences on maize yields of different irrigation strategies in the Ebro Valley.

References

- Amir, J. and T. R. Sinclair, 1991. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. *Field Crops Res.*, 28: 59-69.
- Begg, J. E. and N. C. Turner, 1976. Crop water deficits. *Adv. Agron.* 28: 161-217.
- Boons-Prins, E. R., G. H. J. de Koning, C. A. van Diepen, and F. W. T. Penning de Vries, 1994. Crop specific simulation parameters for yield forecasting across the European Community. *Simulation Reports CABO-TT 32, AB-DLO, Wageningen*, 43 pp. + appendices.
- Boyer, J. S. and M. G. McPherson, 1976. Physiology of water deficits in cereal crops. *Adv. Agron.*, 27: 1-24.
- Cabelguenne, M., C. A. Jones, J. R. Marty, P. T. Dyke, and J. R. Williams, 1990. Calibration and validation of EPIC for crop rotation in Southern France. *Agric. Syst.*, 33: 153-171.
- Doorenbos, J. and W. O. Pruitt, 1977. Crop water requirements. *FAO. Irrigation and Drainage. Paper 24. Rome*, 144 pp.

- Driessen, P. M., 1986. The water balance of the soil. In: Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. H. Van Keulen and J. Wolf (Eds.). Simulation Monogr. PUDOC, Wageningen, 76-116.
- Fitter, A. H. and R. K. M. Hay, 1987. Environmental physiology of plants. Academic Press, London, 423 pp.
- Habekotté, B., 1997. Description, parameterization and user guide of LINTUL-BRASNAP 1.1. A crop growth model of winter oilseed rape (*Brassica Napus* L.). Quantitative Approaches in Systems Analysis 9. AB-DLO, Wageningen, 40 pp.
- Hanks, R. J., J. Keller, V. P. Rasmussen, G. D. Wilson, 1976. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies. Soil Sci. Soc. Am. J., 40: 426-429.
- Hsiao, T. C., 1990. Measurements of plant water status. Ann. Rev. Plant Physiol., 24: 519-570.
- Jefferies, R. A. and T. D. Heilbronn, 1991. Water-stress as a constraint on growth in the potato crop. I. Model development. Agric. For. Meteorol., 53: 185-196.
- Jones, C. A., J. R. Kiniry and P.T. Dyke, 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station, 194 pp.
- Lamm, F. R., D. H. Rogers, H. L. Manges, 1994. Irrigation scheduling with planned soil water depletion. Am. Soc. of Agric. Eng., 37: 1491-1497.
- Ludlow, M. M., 1975. Effect of water stress on the decline of leaf net photosynthesis with age. In: Environment and Biological Control of Photosynthesis. R. Marcelle (Eds.). Junk, The Hague, 123-134.
- Maas, S. J., 1993. Parameterized model of gramineous crop growth: I. Leaf area and dry mass simulation. Agron. J., 85: 348-353.
- Monteith, J. L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Phil. Trans. R. Soc. Lond., 281: 277-294.
- Muchow, R. C. and T. R. Sinclair, 1991. Water deficit effects on maize yields modeled under current and "greenhouse" climates. Agron. J., 83: 1052-1059.

- Munns, R. and P. C. J. Earson, 1974. Effect of water deficit on translocation of carbohydrate in *Solanum tuberosum*. Aust. J. Plant Physiol., 1: 529-537.
- NeSmith, D. S. and J. T. Ritchie, 1992a. Effects of soil water-deficits during tassel emergence on development and yield component of maize (*Zea mays* L.). Field Crops Res., 28: 251-256.
- NeSmith, D. S. and J. T. Ritchie, 1992b. Maize (*Zea mays* L.) response to a severe soil water-deficit during grain filling. Field Crops Res., 29: 23-35.
- Otegui, M. E., F. H. Andrade, and E. E. Suero, 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. Field Crops Res., 40: 87-94.
- Penman, H. L., 1948. Natural evaporation for open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. of London, A193, 120-146.
- Penning de Vries, F. W. T., D. M. Jansen, H. F. M. ten Berge, and A. Bakema, 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Simulation Monogr. PUDOC, Wageningen, 271 pp.
- Rappoldt, C. and D. W. G. Van Kraalingen, 1996. The fortran simulation translator FST. Version 2.0. Introduction and reference manual. Quantitative Approaches in Systems Analysis, 5. AB-DLO, Wageningen, 178 pp.
- Rhoades, J. D., A. Kandiah, and A. M. Mashali, 1992. The use of saline waters for crop production. FAO. Irrigation and Drainage. Paper 48. Rome, 133 pp.
- Rhoads, F. M. and J. M. Bennett, 1990. Corn. In: Stewart, B. A. and D.R. Nielsen, (Eds), Irrigation of Agricultural Crops. Madison, Wisconsin, 569-596.
- Richards, L. A., 1949. Methods of measuring soil moisture tension. Soil Sci., 68,95-112.
- Ritchie, J. T., 1972. Model for predicting evaporation from row crop with incomplete cover. Water Resources. Res., 8, 1204-1213.
- Robertson, M.J. and F. Giunta, 1994. Responses of spring wheat exposed to pre-anthesis water stress. Aust. J. Agric. Res., 45,19-35.
- Sibma, I. 1987. Ontwikkeling en groei van mais. Gevassenreeks, deel I, Pudoc, Wageningen, 57 pp.

- Spitters, C. J. T. and A. H. C. M. Schapendonk, 1990. Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation. *Plant and Soil*, 123, 193-203.
- Stockle, C. O., S. A. Martin, and G. S. Campbell, 1994. CropSyst, a cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.*, 46, 335-359.
- Struik, P. C., M. Doorgeest, and J. G. Boonman, 1986. Environmental effects on flowering characteristics and kernel set of maize (*Zea mays L.*). *Netherlands J. Agric. Sci.*, 34, 469-484.
- Van Keulen, H., 1986. A simple model of water-limited production. In: H. Van Keulen, and J. Wolf, (Eds), *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Simulation Monogr. PUDOC, Wageningen*, 130-152.
- Van Keulen, H., N. G. Seligman, and R. W. Benjamin, 1981. Simulation of water and use herbage growth in arid regions -a re-evaluation and further development of the model "ARID CROP". *Agric. Syst.*, 6, 159-193.
- Warrington, I. J. and E. T. Kanemasu, 1983. Corn growth response to temperature and photoperiod. III. Leaf number. *Agron. J.*, 75, 762-766.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES FINALES

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES FINALES

Comparación del maíz y sorgo en condiciones de riego deficitario

La aplicación diferencial de agua mediante la fuente lineal de aspersión produjo un descenso gradual con la distancia a la línea de aspersión de la ET estacional, el crecimiento, la biomasa aérea, el rendimiento y el índice de cosecha (IC) del maíz y del sorgo en ambos años. Las reducciones fueron mayores en 1994 que en 1995 en ambos cultivos, debido al efecto aditivo del riego deficitario y salinidad del suelo en 1994.

En 1994, no se encontraron diferencias significativas en la respuesta del maíz y del sorgo al estrés hídrico y salino.

En 1995, el déficit hídrico causó mayores reducciones en maíz que en sorgo. El rendimiento del maíz fue superior al del sorgo bajo riego completo mientras que el sorgo fue más productivo que el maíz para niveles análogos de riego deficitario.

El agotamiento de agua del suelo en el sorgo fue mayor y a más profundidad que en el maíz.

Se encontraron relaciones de tipo lineal entre el rendimiento y la ET o el agua de riego aplicada, con mayores pendientes en maíz que en sorgo. Las reducciones de rendimiento en ambos cultivos y en ambos años se explican fundamentalmente por la reducción en el número de granos por metro cuadrado.

La eficiencia en el uso del agua de riego (IWUE) se redujo linealmente en el maíz para cantidades decrecientes de agua aplicada, mientras que se mantuvo constante en el sorgo para un amplio rango de niveles de riego deficitario.

La superioridad del sorgo bajo condiciones de déficit hídrico se asoció a 1) una mayor capacidad de extracción de agua del suelo (hasta menores potenciales y mayor profundidad), 2) una mayor eficiencia en el uso de agua de riego y 3) unas características foliares (menor coeficiente de extinción de luz y

hojas más erectas) que le confirieron una adaptación y respuesta superior al estrés hídrico.

- Los resultados de este trabajo constataron la superioridad productiva del maíz si el suministro de agua no es un factor limitante. En las condiciones semiáridas del nordeste de España y para suelos de características similares a las del ensayo, el sorgo podría ser una alternativa viable al maíz en condiciones de riego deficitario.

Efecto del riego deficitario en distintas fases de desarrollo del maíz

En el ensayo de riego deficitario en las distintas fases de desarrollo del maíz, la alta variabilidad en la profundidad del suelo en la parcela experimental contribuyó a aumentar la variabilidad en la humedad disponible en el suelo, el crecimiento y rendimiento del cultivo. Pese a ello, se obtuvieron diferencias significativas entre los tratamientos de riego completo o deficitario en las distintas fases.

La altura de planta, la fracción de PAR interceptado y el área foliar no se redujeron significativamente hasta el momento de floración, excepto en el tratamiento más deficitario (sss). El riego deficitario en la fase III (llenado de grano) produjo un adelanto de la senescencia foliar.

El menor valor del coeficiente de extinción de luz en los tratamientos de riego deficitario fue asociado a los mecanismos de enrollamiento foliar y a una disposición más erecta de las hojas.

Se encontró un efecto significativo del factor año y de la interacción entre año y tratamientos en el rendimiento en grano. El rendimiento en grano fue mayor en 1996 que en 1995 debido a las diferencias en climatología entre los dos años.

El riego deficitario en la fase II (floración) en ambos años y en la fase I (vegetativa) en 1995 redujo significativamente el rendimiento en grano. El riego deficitario en la fase II en ambos años redujo significativamente el índice de cosecha (IC). El riego deficitario en la fase III no afectó significativamente ni a la materia seca aérea, ni al rendimiento en grano ni al IC.

Las reducciones del rendimiento en grano producidas por los tratamientos de riego deficitario fueron debidas a la reducción del número de granos por metro cuadrado (ambos años) y a la reducción del peso del grano (año 1995).

- La fase de floración resultó la más sensible al déficit hídrico producido por un mayor espaciamiento entre riegos, con reducciones significativas de la materia seca aérea, el rendimiento, el IC y los componentes del rendimiento. Para las condiciones de alta demanda evaporativa del Valle medio del Ebro y para un suelo de características similares a las de los ensayos, el riego deficitario en la fase vegetativa y especialmente en la fase de floración ocasiona reducciones importantes del rendimiento del maíz.

Modelización del cultivo del maíz en condiciones de riego deficitario

El modelo de simulación de cultivos LINTUL, adaptado, parametrizado y validado para maíz en las condiciones del Valle medio del Ebro, predijo satisfactoriamente la fenología, el crecimiento y el rendimiento en condiciones de agua no limitante y en distintos tratamiento de riego deficitario.

El modelo predijo adecuadamente la evolución del área foliar bajo condiciones óptimas de riego. La sobreestimación del área foliar encontrada en los tratamientos de riego deficitario, fue atribuida en parte al adelanto en la senescencia foliar producido por el déficit hídrico, que no está considerada en el modelo.

En el ensayo de riego deficitario en distintas fases (PHS-96) el rendimiento fue en general simulado satisfactoriamente. La sobreestimación del rendimiento bajo riego deficitario en la fase II fue atribuida a la mayor sensibilidad del cultivo al estrés hídrico en ésta fase, que no está considerada en el modelo. La infraestimación del rendimiento bajo riego deficitario en la fase I fue atribuida al efecto de acondicionamiento del cultivo producido por un déficit hídrico moderado en las primeras fases de su desarrollo.

En el ensayo de fuente lineal de aspersión (CS-95) el rendimiento fue simulado satisfactoriamente en el tratamiento de riego completo. La sobreestimación del rendimiento en los tratamientos de riego deficitario se atribuyó al desarrollo de un sistema radical más superficial que el considerado por el modelo y al efecto de la salinidad en estos tratamientos.

La incorporación en el modelo de los efectos del estrés hídrico sobre la senescencia, arquitectura foliar y desarrollo radical entre otros, mejoraría su capacidad predictiva.

- El modelo LINTUL dio resultados satisfactorios considerando los objetivos planteados y puede emplearse para el análisis preliminar del efecto de distintas estrategias de riego sobre los rendimientos del maíz en las condiciones del Valle medio del Ebro.



