

RESPUESTA DEL SORGO AL DÉFICIT HÍDRICO EN INVERNADERO, I. FENOLOGÍA, CONSUMO DE AGUA EN LOS PROCESOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN Y TRANSPIRACIÓN, Y RENDIMIENTOS

M.J. Berenguer Merelo

J.M. Faci González

Unidad de Suelos y Riegos (SIA)

Laboratorio de Agronomía y Medio Ambiente

(DGA-CSIC)

Apartado 727

50080 Zaragoza

España

RESUMEN

En condiciones limitantes de agua es necesario conocer la respuesta de los cultivos a un suministro variable de agua y determinar el consumo de agua de éste en sus distintas etapas fenológicas, para así poder efectuar riegos estratégicos que minimicen las pérdidas de rendimiento del cultivo. Asimismo, para una utilización más eficiente y racional del agua es preciso conocer la distribución de la evapotranspiración (ET) en sus dos componentes, transpiración (T) y evaporación, así como la relación de estos procesos con el rendimiento.

El objetivo de este trabajo fue determinar la duración de las diferentes etapas fenológicas del sorgo y el consumo de agua en los procesos de ET y T en cada una de ellas en plantas de sorgo sometidas a un suministro variable de agua de riego. Además, se estableció la relación existente entre el rendimiento del cultivo frente al agua consumida en ambos procesos. Para ello se establecieron dos ensayos simultáneos de riego variable con plantas de sorgo cultivadas en contenedores bajo condiciones controladas de invernadero. En uno de los ensayos se determinó la ET mediante pesada y en el otro se determinó la T cubriendo la superficie de los contenedores para evitar la evaporación de la superficie.

El déficit hídrico afectó al consumo de agua de ambos procesos en todas las etapas fenológicas del sorgo, produciéndose los consumos máximos en el período que va de zurrón hinchado a floración media. Tanto la producción de materia seca como el rendimiento en grano mostraron una correlación lineal con los valores estacionales de ET y T, obteniéndose correlaciones más altas en el caso de la T. Además, el déficit hídrico produjo una reducción significativa en la eficiencia del uso del agua (EUA), aunque no de la eficiencia de la transpiración (TE).

Palabras clave: Sorgo, Invernadero, Fenología, Evapotranspiración, Transpiración, Déficit hídrico, Eficiencia del uso del agua, Rendimientos.

SUMMARY
SORGHUM RESPONSE TO WATER STRESS UNDER GREENHOUSE
CONDITIONS. I. PHENOLOGY. EVAPOTRANSPIRATION, TRANSPIRATION
AND YIELD.

Under limited water conditions, the knowledge of crop response to a variable supply of water and crop water use in the different phenological stages are very important parameters to establish strategic irrigation and minimize yield losses. Partitioning of evapotranspiration (ET) in transpiration (T) and soil evaporation is also a key factor for a more efficient use of water in irrigation.

The main goal of the present paper was to determine the duration and crop water use in ET and T in the different phenological stages of sorghum plants under a variable supply of irrigation water. Relations between sorghum yield and water use in both processes were studied. Two simultaneous irrigation experiments with sorghum plants cultivated in pots in a greenhouse were performed. In one experiment ET was obtained by weighing the individual pots. In the other, T was obtained by weighing the pots covered with aluminum foil to avoid soil evaporation.

Water stress affected sorghum water use in both processes during all the phenological phases. Maximum values were obtained in the booth stage. Dry matter production and grain yield were linearly correlated with seasonal ET and T, with higher correlations in the case of T. Water stress also produced a significant reduction in water use efficiency but did not affect transpiration efficiency.

Key words: Sorghum, Greenhouse, Phenology, Evapotranspiration, Transpiration, Water stress, Water use efficiency, Yield.

Introducción

En las zonas áridas y semiáridas, el principal factor limitante que determina la producción de los cultivos es el agua. En estas zonas la única alternativa válida para aumentar los rendimientos es el riego (FACI, 1986). Pero el riego no es una solución viable en todos los casos ya que el agua es un recurso escaso y con una demanda en continuo aumento. El incremento de la población y el aumento de las necesidades hídricas en sectores no agrícolas (abastecimiento urbano, industrial...) imponen una utilización más eficiente y racional del agua para mantener y aumentar la productividad de los regadíos. Por tanto, debido a la creciente escasez de agua de

riego en gran parte de nuestros regadíos, ésta debe ser aplicada en las cantidades y épocas adecuadas, de manera que se pueda realizar una mejor planificación de los recursos hídricos disponibles y efectuar riegos estratégicos que minimicen las pérdidas de rendimientos de los cultivos (FACI *et al.*, 1988; FACI y BERCERO, 1989).

El efecto del estrés hídrico sobre la producción de grano y sus componentes en los cereales depende fundamentalmente de la etapa del ciclo biológico en la cual se produce el déficit hídrico, así como de su intensidad y duración (BEGG y TURNER, 1976; HOOKER, 1985; FISCHER, 1980; BRADFORD y HSIAO, 1982), siendo la etapa más sensible del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) la que va de zurrón hinchado a floración

(LEWIS *et al.*, 1974). El conocimiento de la distribución de la evapotranspiración (ET) en sus dos componentes transpiración (T) y evaporación (E), así como el estudio de sus interacciones es de gran importancia para establecer el efecto de diferentes prácticas agronómicas sobre el uso del agua por el cultivo, y para analizar las posibles consecuencias prácticas que del mismo se pueden derivar. Así, COOPER (1983) y COOPER y GREGORY (1987) indicaron que la relación E/T es el principal factor que afecta a la eficiencia del uso del agua de los cultivos.

Por otro lado, el sorgo posee unas características que lo hacen tolerante a las altas temperaturas, a la sequía y a la salinidad (MARTÍN *et al.*, 1976; DOORENBOS y KASSAM, 1979; KRIEG y LASCANO, 1990), permitiéndole obtener rendimientos económicos bajo condiciones limitantes de agua en comparación con otros cultivos de verano como el maíz. Por esta razón el sorgo podría ser una alternativa rentable a otros cultivos en zonas marginales del valle medio del Ebro donde el suministro de agua puede ser deficitario durante el periodo de riegos.

El objetivo de este trabajo fue realizar un estudio detallado de la fenología del sorgo en plantas cultivadas en invernadero para determinar la duración de cada una de las etapas de su desarrollo y estudiar el consumo de agua en los procesos de evapotranspiración y transpiración en cada una de ellas. Además, se estableció la relación existente entre el rendimiento en grano y la producción de materia seca frente al agua consumida en ambos procesos.

Material y métodos

En el presente trabajo, el estudio de la fenología del cultivo del sorgo se ha reali-

zado estableciendo once etapas de desarrollo a partir de los diez estados fenológicos definidos inicialmente por VANDERLIP y REEVES (1972). Las observaciones fenológicas en las plantas de todos los tratamientos se efectuaron con una frecuencia de uno a dos días.

La etapa correspondiente al estado fenológico, que estos autores definen como floración media, fue dividida en dos etapas que se denominaron emergencia de la inflorescencia y antesis. Se han introducido las definiciones de estas dos nuevas etapas y se han completado las definiciones de las etapas fenológicas del desarrollo de la panícula con nuevas aportaciones de las características observadas en la planta. Se consideró que el inicio de cada etapa se producía cuando el 50% de las plantas se encontraban en ese estado fenológico.

Se realizaron dos ensayos de forma simultánea en los cuales se estudió la respuesta de plantas de sorgo cultivadas en contenedores en el interior de un invernadero de cristal, a un suministro variable de agua de riego. En uno de los ensayos, que se denominó ensayo de evapotranspiración (ensayo ET), se determinó la ET de plantas individuales de sorgo. En el otro, que se denominó ensayo de transpiración (ensayo T), se determinó la T de plantas de sorgo en contenedores cubiertos en su superficie para evitar las pérdidas por evaporación.

En ambos ensayos se utilizaron contenedores de plástico de 16 l de capacidad y 0,6 Kg de peso que contenían 10 Kg de un sustrato artificial secado al aire y con un contenido de humedad del 6%. Este sustrato estaba compuesto por una mezcla de arena, turba y tierra en una proporción volumétrica respectiva de 1/2/1. La tierra poseía una textura franco-limosa y provenía del horizonte superficial de un suelo de

la finca experimental del Servicio de Investigación Agroalimentaria (S.I.A) en Montañana (Zaragoza). La humedad gravimétrica máxima retenida por el sustrato era de 56,9%, y el punto de marchitamiento (succión a -1,5 MPa) fue de 6,4%.

El 22 de mayo de 1993 se realizó la siembra del sorgo (cv. P-8501) en una bandeja con alvéolos. Cuando las plántulas alcanzaron un estadio de cuatro hojas y una altura media de 16 cm se trasplantaron con el sustrato de cada alvéolo a los contenedores. Después del trasplante, las macetas se regaron con 5 litros de agua.

En el ensayo de ET se establecieron 5 tratamientos diferenciales de riego con 4 repeticiones por tratamiento. Dichos tratamientos se realizaron de forma que la humedad del suelo se mantuvo entre ciertos límites, para lo cual se dieron dos riegos por semana de cantidades variables de agua, colocando las macetas en una balanza y añadiendo agua de riego hasta un peso preestablecido en cada tratamiento. Estos pesos fueron los siguientes:

- 1- Tratamiento 1. Peso máximo de sustrato + humedad = 15 Kg.
- 2- Tratamiento 2. Peso máximo de sustrato + humedad = 14 Kg.
- 3- Tratamiento 3. Peso máximo de sustrato + humedad = 13 Kg.
- 4- Tratamiento 4. Peso máximo de sustrato + humedad = 12 Kg.
- 5- Tratamiento 5. Peso máximo de sustrato + humedad = 11,5 Kg.

De esta forma se creó un gradiente decreciente de humedad en el sustrato desde el tratamiento 1 que fue el más regado hasta el tratamiento 5 donde se impuso el máximo estrés hídrico. Así, los contenedores de los tratamientos 1, 2, 3, 4 y 5, al-

canzaron unos porcentajes de humedad gravimétrica (θ) máximos del 50,2%, 39,8%, 29,3%, 18,9% y 13,7% respectivamente.

En el ensayo de T se establecieron tres tratamientos de riego, con cuatro repeticiones, que coincidieron con los tratamientos 1, 3 y 5 del ensayo de ET. Las macetas de este ensayo se mantuvieron cubiertas con papel de aluminio, sellando su superficie completamente, a lo largo de todo el ensayo para evitar la evaporación directa de la superficie del suelo. Las macetas sólo se descubrieron durante breves momentos al efectuar los riegos diferenciales dos veces por semana.

En los tratamientos 1 de ambos ensayos se colocó una bandeja debajo de cada una de las macetas para controlar el drenaje existente.

En todos los contenedores de todos los tratamientos de ambos ensayos se midió el agua aplicada en cada riego. Se aplicó un total de 28 riegos. Asimismo, se realizaron aplicaciones semanales de abono foliar en las hojas para la adecuada fertilización del cultivo.

En cada uno de los contenedores de cada tratamiento, el volumen de agua evapotranspirada (ensayo de ET) y transpirada (ensayo de T) se determinó como la diferencia de peso entre dos riegos consecutivos. Este valor se dividió por el número de días correspondiente al intervalo entre dos riegos consecutivos para obtener la tasa diaria de evapotranspiración (ensayo de ET) o transpiración (ensayo de T).

La temperatura del aire y la humedad relativa en el interior del invernadero se controlaron mediante un termohigrógrafo situado junto a los contenedores de las plantas de sorgo. También se caracterizó la radiación fotosintéticamente activa (PAR)

en el interior del invernadero, así como la existente en el ambiente exterior, mediante un medidor de radiación (PAR) modelo ELE. Así, se obtuvo que la cubierta de cristal del invernadero redujo en un 34% la radiación fotosintéticamente activa respecto a la del exterior.

El valor de la ET estacional de cada maceta se obtuvo mediante la suma de la ET estimada durante el periodo comprendido desde la siembra (0 DDS) y el estadio de 4 hojas (20 DDS), en que se realizó el trasplante a las macetas, y la ET medida por diferencia de pesadas desde el día 20 DDS hasta el cosechado. La ET inicial de siembra a trasplante (20 días) se calculó multiplicando la evapotranspiración de referencia (ET_0) por el coeficiente de cultivo correspondiente a la fase inicial del mismo (Kci). La ET_0 se calculó a partir de datos meteorológicos mediante el método de FAO Blaney-Criddle (DOORENBOS y PRUITT, 1977).

El cosechado del cultivo de sorgo se realizó el 7 de octubre de 1993, después de alcanzada la madurez fisiológica, que en el sorgo ocurre cuando se forma una mancha negra en la base del grano maduro (MARTÍN *et al.*, 1976), ya que después de la formación de dicha mancha la translocación de nutrientes al grano es despreciable (EASTIN *et al.*, 1973). Las plantas de sorgo se separaron en hojas, tallos, vainas, raíces y panículas. Las raíces fueron separadas del substrato mediante lavado con chorro de agua a presión. Estos componentes de la planta se llevaron a estufa a 60°C hasta peso constante, y posteriormente se separó el grano de las panículas para la obtención del peso de grano, peso de mil granos, número de granos por panícula e índice de cosecha (IC). El IC se calculó como la relación entre la

producción de grano seco y la materia seca total. Para determinar el peso de mil granos se utilizó un contador electrónico de semillas (modelo Numigral, Tripette et Renaud, París, Francia), y balanza de precisión.

Resultados y discusión

Fenología del sorgo. Etapas fenológicas

De acuerdo a las observaciones fenológicas realizadas en las plantas de sorgo se establecieron las siguientes etapas fenológicas:

ETAPA 0. Emergencia. El coleóptilo es visible en la superficie del suelo. Esto ocurre generalmente entre 3 y 10 días después de siembra, dependiendo de las condiciones ambientales (foto 1).

ETAPA 1. Aparición del collar de la tercera hoja. Ocurre aproximadamente 10 días después de la emergencia. Sin embargo el tiempo requerido para alcanzar esta etapa puede variar ampliamente con las condiciones ambientales (foto 2).

ETAPA 2. Aparición del collar de la quinta hoja. Esta etapa ocurre cerca de la tercera semana después de la emergencia. En este momento la primera hoja puede haberse perdido (foto 3).

ETAPA 3. Punto de diferenciación del desarrollo. Representa el cambio en el punto de desarrollo de la etapa vegetativa a la etapa reproductora. Aproximadamente de 7 a 10 hojas están completamente expandidas, dependiendo de la madurez del sorgo. Como criterio previo se toma cuando el cultivo está aproximadamente en la etapa de 8 hojas (foto 4). Esto ocurre aproximadamente a los 30 días de la emergencia. En

este tiempo comienza la elongación del tallo. También, pueden haberse perdido de 1 a 3 hojas. El tiempo desde emergencia a iniciación floral varía de 32 a 44 días para 12 variedades estudiadas de sorgo. PAULI *et al.* (1964) encontraron que el tiempo transcurrido desde siembra al punto de diferenciación del desarrollo es aproximadamente 1/3 del tiempo requerido para la madurez fisiológica, independientemente de la fecha de siembra o variedad.

ETAPA 4. Aparición de la hoja final en verticilo. Aparece la punta de la hoja bandera. En esta etapa ocurre la elongación rápida del tallo. Todas las hojas excepto las 3 ó 4 finales están completamente expandidas. Las 2 ó 3 más bajas probablemente se han perdido (foto 5).

ETAPA 5. Zurrón. Todas las hojas están completamente expandidas suministrando la máxima área foliar. La espiga está cercana a su longitud máxima y envuelta por la vaina de la hoja bandera (foto 6). En esta etapa comienza la elongación del pedúnculo y el resto del tallo se encuentra ya cercano a su longitud máxima.

ETAPA 6a. Emergencia de la inflorescencia. Es visible la parte superior de la inflorescencia (foto 7).

ETAPA 6b. Antesis. Aparecen los estambres en el 50% de la panícula (foto 8). Esto ocurre aproximadamente cuando han transcurrido 2/3 del tiempo desde emergencia a madurez fisiológica. El momento de inicio de esta etapa depende de los antecedentes de la planta y de las condiciones ambientales.

ETAPA 7. Grano pastoso blando. La materia seca del grano ha alcanzado la mitad de su peso final. El contenido del grano es cremoso, firme y difícilmente puede exprimirse. Al rayar con la uña desa-

parece la marca (foto 9). El peso del tallo ha disminuido ligeramente y sólo permanecen de 8 a 12 hojas funcionales.

ETAPA 8. Grano pastoso duro. La materia seca del grano ha acumulado 3/4 partes de su peso final. El contenido del grano está seco. Al rayar con la uña se mantiene la huella. Ha perdido el color verde, tornándose a marrón-rojizo (foto 10). Normalmente ya se ha producido una pérdida adicional de hojas.

ETAPA 9. Madurez fisiológica. El grano es muy duro, no se raya con la uña, y se caracteriza porque se produce una mancha negra en la base de dicho grano maduro (MARTÍN *et al.*, 1976). Después de la formación de dicha mancha la translocación de nutrientes al grano es despreciable (EASTIN *et al.*, 1973) (foto 11). Se alcanza el peso seco máximo de la planta. La humedad del grano en la madurez fisiológica varía con el material genético y antecedentes del cultivo (PAULI *et al.*, 1964).

Consumo de agua en los procesos de ET y T en las diferentes etapas fenológicas del sorgo

En la figura 1 se presenta la evolución de la humedad gravimétrica media del sustrato (θ) de los contenedores en todos los tratamientos del ensayo de ET (a) y del ensayo de T (b).

Al comienzo del ensayo, la humedad gravimétrica (θ) fue similar para todos los tratamientos de riego, debido a que se partió de las mismas condiciones en el momento del inicio de los tratamientos de riego. En el tratamiento I el valor máximo de θ fue del 50,5% en ambos ensayos. En este tratamiento, no obstante, se observó una mayor variabilidad en el ensayo de ET



Foto 1. Etapa 0 del desarrollo del sorgo.
Emergencia. El coleóptilo es visible en la
superficie del suelo
*Stage 0. Emergence. The coleoptile is visible in
the soil surface*



Foto 2. Etapa 1 del desarrollo del sorgo. Planta
con el collar de la tercera hoja visible
Stage 1. Collar of the third leaf is visible



Foto 3. Etapa 2 del desarrollo del sorgo.
Aparición del collar de la quinta hoja
Stage 2. Plant with visible collar of the fifth leaf

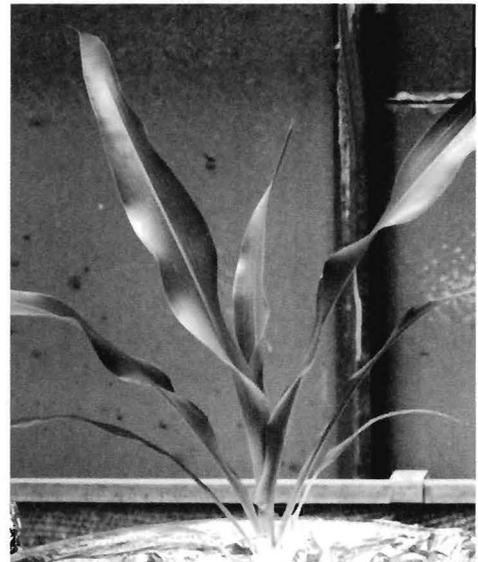


Foto 4. Etapa 3 del desarrollo del sorgo. Planta
en un estado de nueve hojas correspondiente a
la fase del punto de diferenciación del desarrollo
Stage 3. Plant with nine leaves



Foto 5. Etapa 4 del desarrollo del sorgo. Planta en la que se observa el extremo de la hoja bandera
Stage 4. The top of the flag leaf is visible

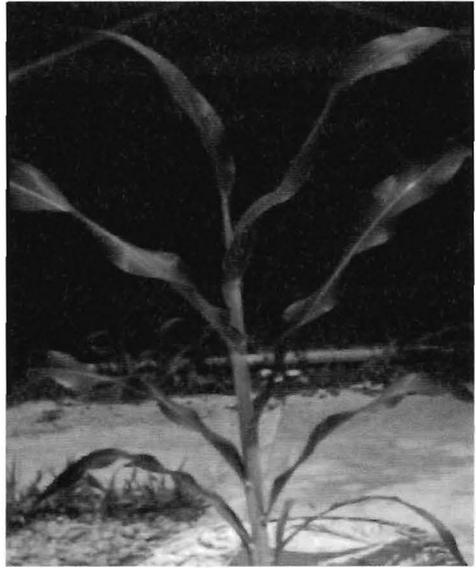


Foto 6. Etapa 5 del desarrollo del sorgo. Planta en estado de zurrón
Stage 5. Plant in boot stage

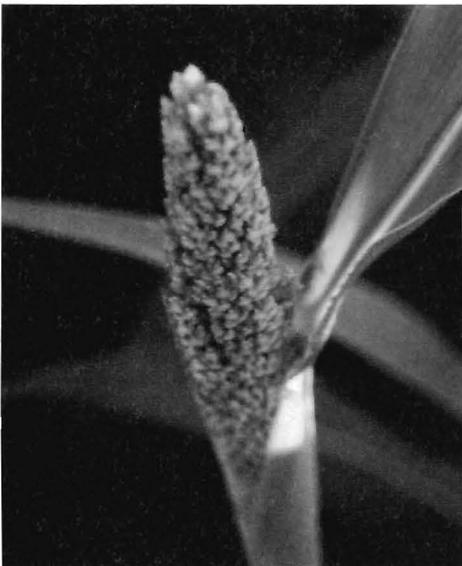


Foto 7. Etapa 6a del desarrollo del sorgo. Emergencia de la inflorescencia. Se pueden observar las primeras espiguillas de la inflorescencia
Stage 6a. Emergence of the panicle

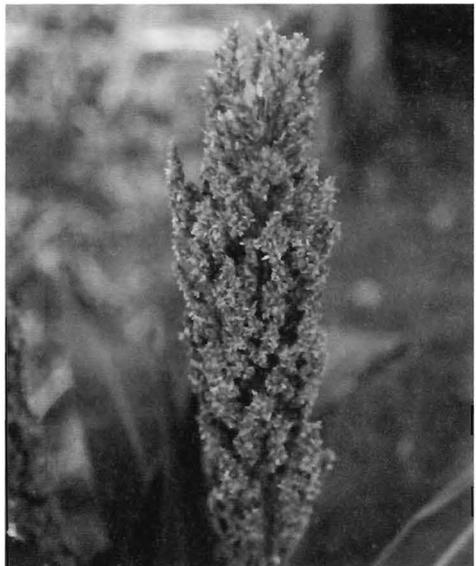


Foto 8. Etapa 6b del desarrollo del sorgo. Planta en fase de anéthesis. apreciándose los estambres
Stage 6b. Plant in anthesis



Foto 9. Etapa 7 del desarrollo del sorgo. Planta en fase de grano pastoso blando
Stage 7 Panicle with grain in soft dough stage

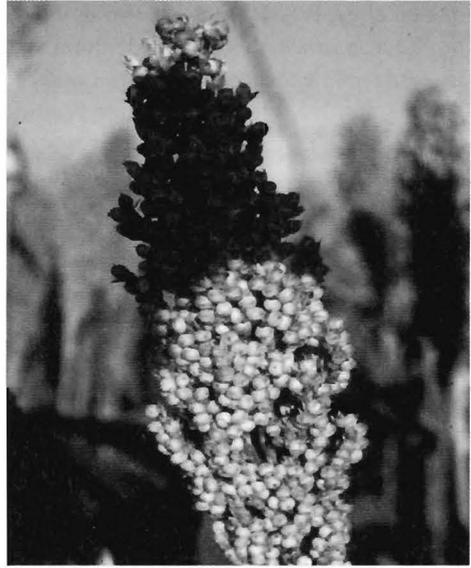


Foto 10. Etapa 8 del desarrollo del sorgo. Planta en fase de grano pastoso duro. Se aprecia el cambio de color del grano a marrón-rojizo (foto 8)
Stage 8. Panicle with grain in hard dough stage

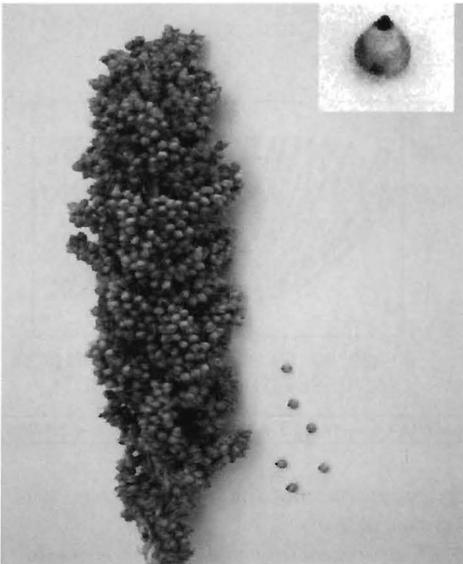


Foto 11. Etapa 9 del desarrollo del sorgo. Madurez fisiológica. Se puede observar la mancha negra en la base del grano maduro (MARTÍN *et al.*, 1976). Un detalle de este aspecto aparece en el extremo superior derecho de la foto
Stage 9. Physiological maturity

que en el de T. Así, en el ensayo de ET se produjeron unos descensos de humedad más fuertes, llegando a valores mínimos de 37,0% durante el periodo comprendido entre el día 59 y 73 DDT, que corresponde al periodo que va de zurrón hinchado a floración media. En el tratamiento 2, el valor de θ máximo alcanzado en el ensayo de ET fue de 39,8%. En el tratamiento 3, el valor de θ fue de 29,3% una vez alcanzado el peso preestablecido en los contenedores. Hay que destacar, al igual que en el tratamiento 1, la mayor variabilidad de θ en el ensayo de ET que en el ensayo de T. Así, los valores mínimos de θ alcanzados en el ensayo de ET llegaron al 18,1%, mientras que sólo llegaron al 21,5% en el ensayo de T. En el tratamiento 4 del ensayo de ET se observó un descenso gradual de θ hasta el día 41 DDT, fecha en la cual se alcanzó el peso establecido para este tratamiento. A partir de esta fecha el porcentaje de θ fue del 18,9% hasta el final del ensayo. En cuanto al tratamiento 5 de los ensayos de ET y T, el valor máximo de θ alcanzado fue del 13,7%. En el ensayo de ET se

observó un descenso gradual de θ en el periodo inicial hasta el día 45 DDT. En el ensayo de T, dicho periodo se extendió hasta el día 60 DDT. Al igual que en los tratamientos 1 y 3, la variación de humedad del tratamiento 5 fue mayor en el ensayo de ET. Los valores mínimos de θ alcanzados fueron del 8,6% para el ensayo de ET y del 10,9% para el ensayo de T. Asimismo, se observó en todos los tratamientos que el rango de variación de θ entre riegos fue menor en el tratamiento 5 que en los demás tratamientos, debido probablemente a la escasa disponibilidad de agua en este tratamiento.

En los cuadros 1 y 2 se presentan los valores de la duración de las diferentes etapas fenológicas del cultivo de sorgo, así como el consumo de agua por los procesos de ET y T en dichas etapas, respectivamente.

La etapa fenológica de mayor duración correspondió a la de anthesis (etapa 6b), con una duración media de 24 días en el ensayo de ET y de 23 días en el ensayo de T, no

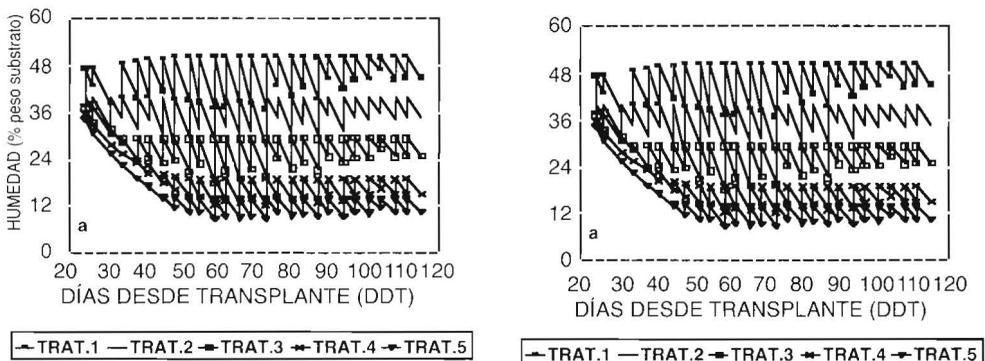


Figura 1. Evolución de la humedad gravimétrica del substrato alcanzada en los contenedores del ensayo de ET (a) y del ensayo de T (b)

Figure 1. Evolution of substrate water content in the ET experiment (a) and the T experiment (b)

CUADRO I
DURACIÓN DE LAS ETAPAS FENOLÓGICAS Y CONSUMO DE AGUA EN EL
PROCESO DE ET EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DE RIEGO

*TABLE I
DURATION OF THE PHENOLOGICAL STAGES AND WATER USE IN ET IN THE
DIFFERENT TREATMENTS*

Tratamiento	Etapa de Desarrollo	DDS	Duración de la etapa (días)	Consumo diario (cm ³ /pl/día)	Consumo total (cm ³ /pl)
Todos los tratamientos	0	7	13	–	–
Todos los tratamientos	1	20	15	223,5	3.352,1
1			17	244,7	4.160,8
2			19	220,8	4.195,9
3	2	35	19	203,1	3.859,6
4			19	186,7	3.547,1
5				195,2	3.708,3
1	3	52	15	246,2	3.693,8
2	3	54	13	227,2	2.954,2
3	3	54	14	154,2	2.158,8
4	3	54	19	102,3	1.944,6
5	3	54	21	85,8	1.801,3
1	4	67	5	280,7	1.403,9
2	4	67	5	278,4	1.392,1
3	4	68	5	203,0	1.015,0
4	4	73	4	152,3	609,2
5	4	75	4	123,4	493,8
1	5	72	6	344,5	2.006,9
2	5	72	7	249,8	1.748,7
3	5	73	6	248,5	1.491,3
4	5	77	4	165,6	662,5
5	5	79	3	141,2	423,7
1	6a	78	6	349,9	2.099,4
2	6a	79	6	231,4	1.388,4
3	6a	79	6	252,5	1.515,0
4	6a	81	6	155,8	934,6
5	6a	82	4	111,2	445,0
1	6b	84	23	280,8	6.457,5
2	6b	85	24	229,0	5.495,3
3	6b	85	24	201,6	4.839,1
4	6b	87	25	137,7	3.442,3
5	6b	86	24	110,9	2.662,5

CUADRO 1 (Continuación)

1	7	107	13	176,3	2.291,9
2	7	109	13	160,9	1.092,1
3	7	109	13	140,6	1.827,9
4	7	112	9	116,7	1.050,6
5	7	110	11	95,8	1.053,8
1	8	120	8	125,7	1.005,6
2	8	122	7	130,6	914,6
3	8	122	6	106,5	639,2
4	8	121	4	107,8	431,3
5	8	121	3	69,6	208,7
1	9	128	7*	146,6	1.026,2
2	9	129	6*	134,7	808,3
3	9	128	7*	122,7	858,8
4	9	125	10*	102,9	1.029,4
5	9	124	11*	86,2	948,7

* Estos valores corresponden al período que va desde el comienzo de la etapa 9 hasta cuatro días después del último riego, en que se realizó la cosecha.

existiendo prácticamente diferencias entre los tratamientos de riego aplicados.

En los ensayos de ET y T se observó un acortamiento de la etapa de grano pastoso duro (etapa 8) con el aumento del estrés hídrico. Así, esta etapa tuvo una duración de 8 y 11 días para las plantas del tratamiento 1 de los ensayos de ET y T, respectivamente, y de 3 y 7 días para las plantas del tratamiento 5 de ambos ensayos.

En la figura 2 se representa la duración de los periodos que van desde siembra hasta el inicio de la etapa de antesis y desde antesis a maduración fisiológica para los diferentes tratamientos de riego en los ensayos de ET y T.

En el ensayo de ET, la fecha de antesis sufrió un ligero retraso en los tratamientos más estresados (tratamientos 4 y 5), no existiendo diferencias significativas entre los demás tratamientos y el tratamiento más

regado. Asimismo, se detectó un adelanto en la fecha de maduración con el aumento del estrés hídrico, y consecuentemente un acortamiento del periodo de llenado de grano. Así, se observó una diferencia de 6 días en este periodo entre los tratamientos extremos (figura 2a). El retraso sufrido en algunas etapas de este periodo se compensó con el adelanto de otras etapas en cada uno de los tratamientos (cuadro 1).

En el ensayo de T (figura 2b) se produjo un retraso en la fecha de floración de 4 días entre el tratamiento 1 y el tratamiento 5, y el periodo de llenado de grano se acortó en 4 días en el tratamiento 5. Es de destacar que la duración del periodo de llenado de grano en el tratamiento 5 (43 días) y en el tratamiento 3 (44 días) del ensayo de T, coincide con la duración de este periodo en los tratamientos 3 (43 días) y 1 (44 días) del ensayo de ET, respectivamente. Esto es debido a la mayor disponibilidad de agua

CUADRO 2
DURACIÓN DE LAS ETAPAS FENOLÓGICAS Y CONSUMO DE AGUA EN EL
PROCESO DE TRANSPIRACIÓN (T) EN LOS TRATAMIENTOS 1, 3 Y 5

TABLE 2
DURATION OF THE PHENOLOGICAL STAGES AND WATER USE IN T IN THE
TREATMENTS 1, 3 AND 5

Tratamiento Consumo	Etapa de desarrollo	DDS	Duración de la etapa (días)	Consumo diario (cm ³ /pl/día)	Consumo (cm ³ /pl)
Todos los tratamientos	0	-	-	-	-
Todos los tratamientos	1	-	-	-	-
1			15	51.9	778.7
3	2	35	19	38.7	736.0
5			19	39.9	758.5
1	3	50	13	90.4	1.175.4
3	3	54	14	78.6	1.101.2
5	3	54	14	65.6	918.8
1	4	63	5	151.4	756.9
3	4	68	5	120.3	601.7
5	4	68	5	58.08	290.4
1	5	68	7	152.3	1.066.2
3	5	73	6	182.4	1.094.6
5	5	73	7	94.2	659.6
1	6a	75	7	228.7	1.601,2Ç
3	6a	79	6	150.4	902.2
5	6a	880	6	59.6	357.5
1	6b	82	23	146.1	3.359.4
3	6b	85	22	121.1	2.664.1
5	6b	86	23	54.8	1.260.8
1	7	105	13	87,3	1.135,0
3	7	107	14	65,4	915,0
5	7	109	13	32,7	425,0
1	8	118	11	44.2	486.5
2	8	121	8	33,7	269,6
5	8	122	7	21,7	152,1
1	9	129	6*	39,9	239,2
3	9	129	6*	35,7	214,2
5	9	129	6*	20,8	124,6

* Estos valores corresponden al período que va desde el comienzo de la etapa 9 hasta cuatro días después del último riego, en que se realizó la cosecha.

en los tratamientos del ensayo de T al no consumirse agua en el proceso de evaporación, por lo que en el ensayo de T, estos tratamientos estuvieron menos estresados que sus equivalentes del ensayo de ET.

En los dos ensayos ET y T se observó un acortamiento del periodo de llenado del grano con el aumento del déficit hídrico. El periodo de llenado del grano tuvo un valor máximo de 47 días en el tratamiento 1 del ensayo de T, y un valor mínimo de 38 días en el tratamiento 5 del ensayo de ET.

Estos resultados concuerdan con los de IGARTUA (1990) obtenidos en dos ensayos realizados en 1987 y 1989 utilizando la téc-

nica de la fuente lineal de aspersión con diferentes genotipos de sorgo, en los que observó un acortamiento del periodo de llenado de grano con el aumento del déficit hídrico, siendo éste de cuatro días para los tratamientos extremos en los dos ensayos. En el ensayo realizado en 1987, que soportó un déficit hídrico más severo, tanto las fechas de floración como de maduración se retrasaron con el aumento del déficit hídrico. Sin embargo, en el ensayo de 1989, el acortamiento del periodo de llenado del grano fue debido a un adelanto en la maduración, ya que la fecha de floración no se vio afectada por la falta de agua. FACI (1986), utilizando esta misma técnica de la

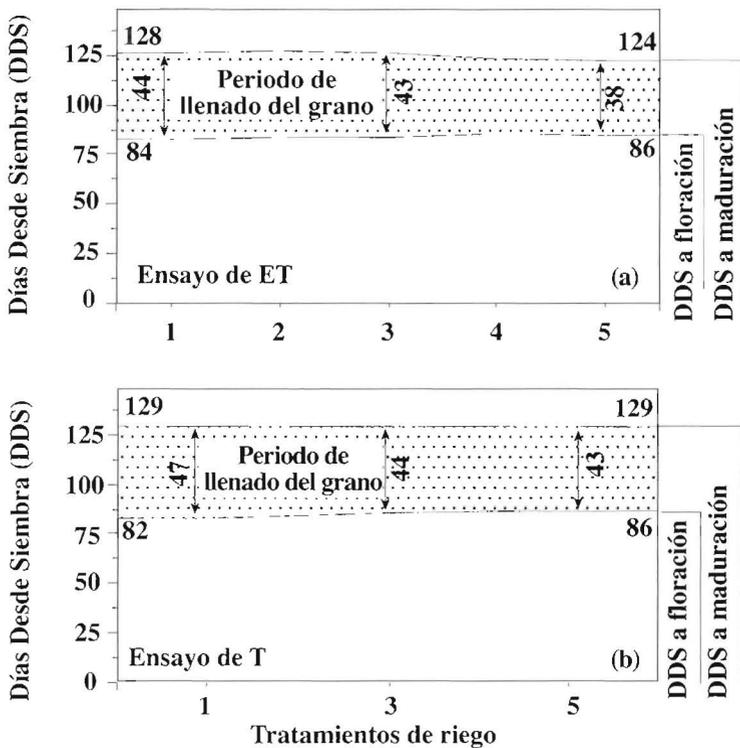


Figura 2. Respuesta fenológica al déficit hídrico en los ensayos de (a) evapotranspiración (ET) y (b) transpiración (T)

Figure 2. Phenological responses of treatments in the ET experiment (a) and in the T experiment (b)

fuelle lineal con un cultivo de sorgo, llegó a la conclusión de que un déficit hídrico moderado indujo una maduración temprana comparada con la obtenida en ausencia de estrés o con un estrés hídrico severo.

Los resultados del presente trabajo confirman la importancia del efecto del déficit hídrico en la fenología y desarrollo del sorgo, acelerando o retrasando el desarrollo fenológico según la duración e intensidad del mismo (GARDNER *et al.*, 1981; DONE *et al.*, 1984 y DONATELLI *et al.*, 1992). Asimismo, GARDNER *et al.* (1981) y DONATELLI *et al.* (1992) observaron que el desarrollo fenológico del sorgo no se afecta hasta que el estrés hídrico alcanza un valor umbral severo y persistente.

En todas las fases fenológicas y en ambos ensayos de ET y T se observa que los tratamientos diferenciales de riego han producido en general una variación considerable de los consumos medios de agua en las distintas etapas fenológicas, tanto en el ensayo de ET como en el ensayo de T. Los consumos mayores de ET y T se produjeron en los tratamientos que mantuvieron un nivel más alto de θ en el suelo y los consumos más bajos se obtuvieron en los tratamientos más secos.

Asimismo, se observó que los consumos mayores de ET y T en todos los tratamientos de riego se produjeron en las etapas 5 y 6a, que corresponden al periodo comprendido desde zurrón hinchado hasta comienzo de la anthesis (etapa 6b), periodo en el cual las plantas presentaban el máximo desarrollo foliar. En el ensayo de ET, el consumo máximo de agua en ET en este periodo se produjo en el tratamiento 1 con un valor de 347,2 cm³/pl y día y el mínimo en el tratamiento 5 con un valor de 126,2 cm³/pl y día. En el ensayo de T, el consumo máximo en T en este periodo se produjo también en

el tratamiento 1 con un valor de 190,5 cm³/pl y día y el mínimo de 76,9 cm³/pl y día en el tratamiento 5.

El valor máximo de la ET estacional fue de 21.616 cm³/pl en el tratamiento 1 y el valor mínimo fue de 9.145 cm³/pl en el tratamiento 5. Los valores de la ET estacional para los tratamientos intermedios se situaron entre estos extremos. El valor máximo de la T estacional fue de 10.131 cm³/pl en el tratamiento 1 y de 4.480 en el tratamiento 5. Los consumos estacionales de agua en ET y T fueron significativamente diferentes ($\alpha = 0,05$) en todos los tratamientos de los ensayos de ET y de T.

Rendimiento y componentes

El cuadro 3 presenta los valores medios de distintos parámetros productivos del sorgo para los diferentes tratamientos de riego en los ensayos de ET y T. Dichos valores se vieron muy afectados por el déficit hídrico, produciéndose un descenso gradual de estos parámetros a medida que aumentaba el déficit hídrico en ambos ensayos.

En el ensayo de ET se obtuvo un valor máximo de producción de materia seca total (MST) de 52,8 g/planta para el tratamiento 1, con un coeficiente de variación (CV) de 6,4%, y un valor mínimo de 18,6 g/planta (CV = 17,0%) para el tratamiento 5. Igualmente, el rendimiento en grano alcanzó un valor máximo de 19,3 g/planta en el tratamiento 1 con un CV de 20,7% y un valor mínimo de 3,0 g/planta en el tratamiento 5 (CV = 21,5%), observándose un descenso drástico de este parámetro con el incremento del déficit hídrico. Esto queda confirmado por el importante descenso del

índice de cosecha (IC) que alcanzó el valor máximo de 0,37 para el tratamiento 1 (CV = 17,4%) y el valor mínimo de 0,16 en el tratamiento 5 (CV = 19,1%). FÁCI y FERERES (1980), FÁCI (1986) e IGARTUA (1990), trabajando en condiciones de campo con diferentes regímenes de riego, encontraron disminuciones considerables del IC del sorgo en los tratamientos deficitarios de riego, aunque no tan acusados como los obtenidos en el presente trabajo.

Por el contrario, el peso seco de hojas, vainas y raíces no se vio tan afectado por el déficit hídrico encontrándose sólo diferencias significativas en el peso seco de hojas y vainas en el tratamiento 1 con respecto a los demás tratamientos. Asimismo, no se encontraron diferencias significativas para el peso seco de raíces entre los diferentes tratamientos de riego.

En el ensayo de T se observó un menor efecto del déficit hídrico que en el ensayo de ET, sobre todo para el tratamiento más deficitario (tratamiento 5). Esto es debido fundamentalmente a la supresión de la evaporación (E) en el ensayo de T. El análisis de varianza conjunto del ensayo de ET y del ensayo de T permitió detectar, tanto para la MST como para el rendimiento en grano, que los tratamientos análogos diferían significativamente en ambos ensayos, siendo superiores en el ensayo de T. Es de destacar que en ambos ensayos la razón raíz/parte aérea se vio muy influenciada por el déficit hídrico, siendo esta influencia mayor en el caso del ensayo de ET.

De estos resultados se puede concluir que la MST, el rendimiento en grano seco, el IC y el peso seco de tallos en los ensayos de ET y de T se vieron muy afectados por el déficit hídrico, produciéndose un descenso gradual de estos parámetros a medida que aumentó el déficit hídrico. Por el con-

trario, este efecto fue mucho menor para los parámetros peso seco de hojas, vainas, peso de mil granos y especialmente para el peso seco de raíces.

Relación entre producción y la evapotranspiración estacional

Para el estudio de las relaciones existentes entre la ET estacional y los diferentes parámetros productivos se procedió al ajuste mediante análisis de regresión lineal simple ($y = a + bx$) de los valores experimentales obtenidos en el ensayo de ET de 1) la producción de la materia seca total (g/pl), 2) el rendimiento en grano seco (g/pl) y 3) el índice de cosecha frente a la evapotranspiración estacional (dm^3).

Los valores obtenidos de materia seca total, rendimiento en grano seco e índice de cosecha frente a la ET estacional se ajustaron bien al modelo de regresión lineal simple, tal como queda representado en la figura 3.

En el caso de la producción de la materia seca total y del rendimiento en grano, las ecuaciones de regresión fueron significativas ($\alpha = 0,05$) con unos altos coeficientes de determinación, 91,55 % y 86,17 % respectivamente. Reducciones de la ET estacional por debajo de la requerida para la máxima producción, se manifiestan en disminuciones en la producción tanto de la materia seca como del rendimiento en grano.

En el caso del IC, la regresión también fue significativa ($\alpha = 0,05$), aunque el coeficiente de determinación fue moderadamente alto (65,81%). Como con los dos parámetros anteriores, el IC disminuye al reducirse la ET estacional.

CUADRO 3
VALORES MEDIOS DEL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES DE LAS PLANTAS INDIVIDUALES DE LOS
TRATAMIENTOS DE LOS ENSAYOS DE ET Y T. CADA VALOR CORRESPONDE A LA MEDIA DE CUATRO
REPETICIONES

TABLE 3
YIELD AND YIELD COMPONENTS IN TREATMENTS OF THE ET AND T EXPERIMENTS. EACH VALUE IS THE MEAN OF
FOUR REPLICATES

VALORES DE RENDIMIENTO Y COMPONENTES DEL ENSAYO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN										
Tratam.	Mat. Seca Total (g)	Panículas (g)	Hojas (g)	Vainas (g)	Tallos (g)	Raíces (g)	Grano (g)	IC	Peso mil granos (g)	Raíz/MS aérea
1	52,80a	24,25a	4,49a	4,64a	11,21a	8,22a	19,35a	0,37a	20,94ab	0,19a
2	42,75b	21,41ab	3,21b	3,10b	6,77b	8,27a	18,18ab	0,42a	25,44b	0,24a
3	40,51b	17,74b	3,53ab	3,42b	7,47b	8,36a	14,81b	0,36a	24,04b	0,26a
4	23,71c	7,42c	2,95b	3,02b	3,96c	6,37a	5,67c	0,24ab	17,89ab	0,38b
5	18,56d	3,97c	3,01b	2,72b	2,33c	6,54a	3,00c	0,16c	13,20a	0,54c
VALORES DE RENDIMIENTO Y COMPONENTES DEL ENSAYO DE TRANSPIRACIÓN										
1	62,07a	32,72a	4,39a	4,39a	10,70a	9,88a	26,87a	0,43a	22,11a	0,19a
2	52,82a	26,92a	3,91ab	4,23a	9,19a	8,58a	22,12a	0,42a	20,90a	0,20a
5	34,62b	14,02b	3,22b	3,64a	5,08b	8,67a	10,96b	0,32b	15,80b	0,33b

* Los tratamientos seguidos de distinta letra indican que son significativamente diferentes a un nivel de significación $\alpha = 0,05$.

Asimismo, se realizó un análisis de regresión simple con estas mismas variables transformadas a valores relativos respecto a sus valores máximos, frente a la ET estacional relativa, es decir como porcentaje de su valor máximo (cuadro 4).

En vista de estos resultados se puede concluir que existe una estrecha relación lineal simple tanto para la producción de materia seca como para el rendimiento en grano frente a la ET estacional.

Esto queda reflejado en numerosos trabajos previos realizados en condiciones de campo e invernadero, en los cuales se indica que para el cultivo de sorgo las relaciones entre el rendimiento en grano o la materia seca total y la ET estacional son esencialmente lineales (HANKS *et al.*, 1969; STEWART y HAGAN, 1973; STEWART *et al.*, 1975; BARRET y SKOGERBOE, 1980; FACI y FERERES, 1980; GARRITY *et al.*, 1982; HANKS, 1983; HOWELL y MUSICK, 1985; FACI, 1986; KRIEG y LASCANO, 1990).

Las relaciones entre producción de grano (Y) y ET son más complejas que para la materia seca, ya que la producción en grano es más sensible a reducciones de ET durante ciertas etapas de crecimiento (GARRITY *et al.*, 1982).

Relaciones entre diferentes parámetros de producción y la transpiración

En el ensayo de transpiración (T) se estudiaron las relaciones existentes entre la producción de materia seca total (g/pl), el rendimiento en grano seco (g/pl) y el índice de cosecha con la transpiración (dm^3), obtenida directamente mediante pesada en el periodo comprendido entre el inicio de los tratamientos (24 DDT) y la madurez fisiológica.

Al igual que en el caso de la ET estacional, las ecuaciones que mejor se ajustaron a los datos experimentales de producción de materia seca (g/pl), rendimiento en grano seco (g/pl) e índice de cosecha frente a la T fueron las de tipo lineal simple (figura 4). Se observa un fuerte descenso en dichas variables al disminuir la transpiración, obteniéndose unos coeficientes de determinación muy altos, tanto para la materia seca (95,76%) como para el rendimiento en grano (88,46%), siendo éstos mayores que para el caso de la ET estacional. En el caso del índice de cosecha también se encontró una relación lineal de este parámetro con la transpiración, siendo esta relación menor que en el caso de la ET ($R^2 = 52,62\%$).

En el cuadro 5 se presentan las ecuaciones de regresión lineal normalizadas de la materia seca, rendimiento en grano seco e índice de cosecha frente a la transpiración acumulada en el periodo considerado.

En condiciones controladas y con cultivos desarrollados en contenedores cubiertos numerosos autores han encontrado una estrecha relación lineal entre la transpiración y la producción de materia seca (DE WITT, 1958; ARKLEY, 1963; HANKS y RASMUSSEN, 1983). Sin embargo, en estudios de campo la transpiración es difícil de estimar, precisamente a causa de la evaporación del suelo. Así, HANKS *et al.* (1969) midieron la evapotranspiración y estimaron la transpiración para el cultivo de sorgo desarrollado en lisímetros. Estos autores estimaron la evaporación de agua desde el suelo, y por su sustracción de la ET estimaron la T. La materia seca se relacionó linealmente tanto con la ET como con la T. En el caso de la ET la función de producción de materia seca estaba desplazada hacia la derecha con respecto a la función de la T, que pasaba por el origen. Este desplazamiento fue debido a la evaporación

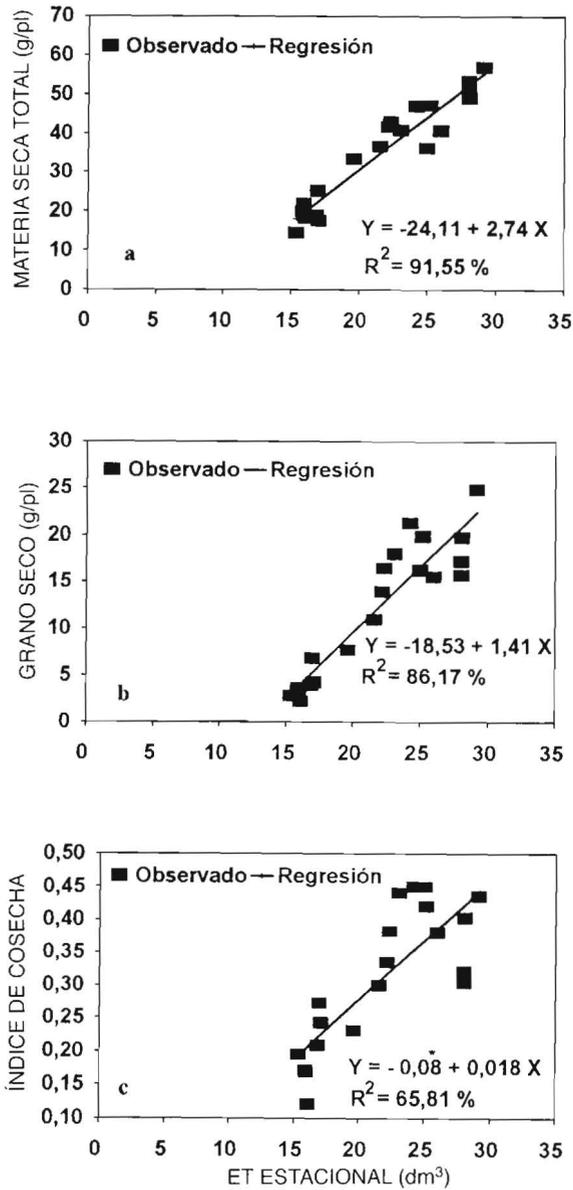


Figura 3. Rectas de regresión lineal de a) la materia seca total (g/pl), b) el rendimiento en grano (g/pl) y c) el índice de cosecha frente a la ET estacional (dm³) del sorgo. Cada punto corresponde a un valor individual. * El intercepto no es significativo a un nivel de significación $\alpha = 0,05$

Figure 3. Linear regression of a) dry matter, b) grain yield and c) harvest index against seasonal ET. Each point is an individual value. * The intercept is not significant at $\alpha = 0,05$ level of significance

CUADRO 4

RECTAS DE REGRESIÓN LINEAL NORMALIZADAS DE LA MATERIA SECA TOTAL (Y_1' %), RENDIMIENTO EN GRANO (Y_2' %) E ÍNDICE DE COSECHA (Y_3' %) FRENTE A LA ET ESTACIONAL (X, %). R^2 = COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (%). n = NÚMERO DE PUNTOS DE LA REGRESIÓN

TABLE 4

NORMALIZED SIMPLE LINEAR EQUATIONS OF DRY MATTER, GRAIN YIELD AND HARVEST INDEX AGAINST SEASONAL ET.

R^2 = DETERMINATION COEFFICIENT, n = NUMBER OF POINTS

Ecuación	R^2 (%)	n
$Y_1' = -42.31 + 1.40 X$	91.55	20
$Y_2' = -74.63 + 1.65 X$	86.17	20
$Y_3' = -18.76* + 1.17 X$	65.81	20

* No es significativamente diferente de cero a un nivel de significación de $\alpha = 0,05$.

CUADRO 5

RECTAS DE REGRESIÓN LINEAL NORMALIZADAS DE LA MATERIA SECA TOTAL (Y_1' %), RENDIMIENTO EN GRANO (Y_2' %) E ÍNDICE DE COSECHA (Y_3' %) FRENTE A LA T ESTACIONAL (X, %) DESDE EL COMIENZO DE LOS TRATAMIENTOS (24 DDT) A LA MADUREZ. R^2 = COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (%). n = NÚMERO DE PUNTOS DE LA REGRESIÓN

TABLE 5

NORMALIZED SIMPLE LINEAR EQUATIONS OF DRY MATTER, GRAIN YIELD AND HARVEST INDEX AGAINST SEASONAL T. R^2 = DETERMINATION COEFFICIENT, n = NUMBER OF POINTS

Ecuación	R^2 (%)	n
$Y_1' = 17.80 + 0.82 X$	95.76	12
$Y_2' = -5.04* + 1.07 X$	88.46	12
$Y_3' = 49.19 + 0.47 X$	52.62	12

* El valor del intercepto no es significativamente diferente de cero a un nivel de significación $\alpha = 0.05$.

desde la superficie del terreno hasta que el cultivo llegó a cubrir el suelo.

Lógicamente, la relación entre T y materia seca debería pasar por el origen. Sin embargo, en nuestro ensayo, la relación materia seca total (MST) frente a la transpira-

ción (T) también fue de tipo lineal (figura 4), aunque no pasaba por el origen debido a que no se consideró la transpiración existente en el periodo inicial, desde nacimiento hasta el comienzo de los tratamientos, que fue de 37 días. Para corregir los

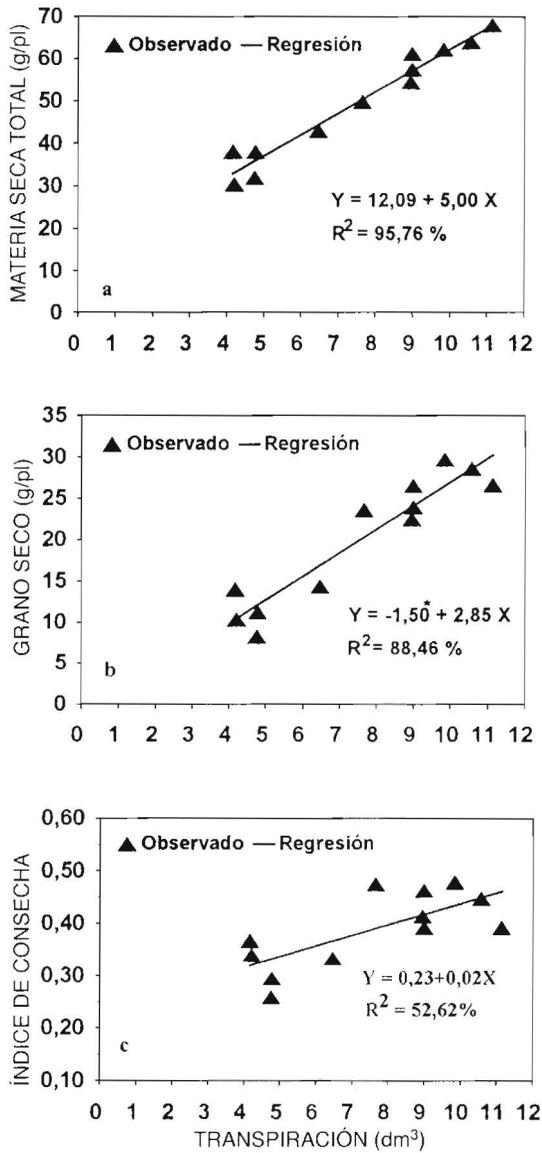


Figura 4. Rectas de regresión lineal simple de a) materia seca (g/pl), b) rendimiento en grano (g/pl) y c) índice de cosecha frente a la transpiración acumulada (dm³) desde el comienzo de los tratamientos (24 DDT) hasta la madurez. Cada punto corresponde a una observación individual. * El valor del intercepto no es significativamente distinto de 0 ($\alpha = 0,05$)

Figure 4. Simple linear regression between a) dry matter production, b) grain yield and c) harvest index against seasonal transpiration. Each point is an individual value. * The intercept is not significantly different of 0 ($\alpha = 0,05$)

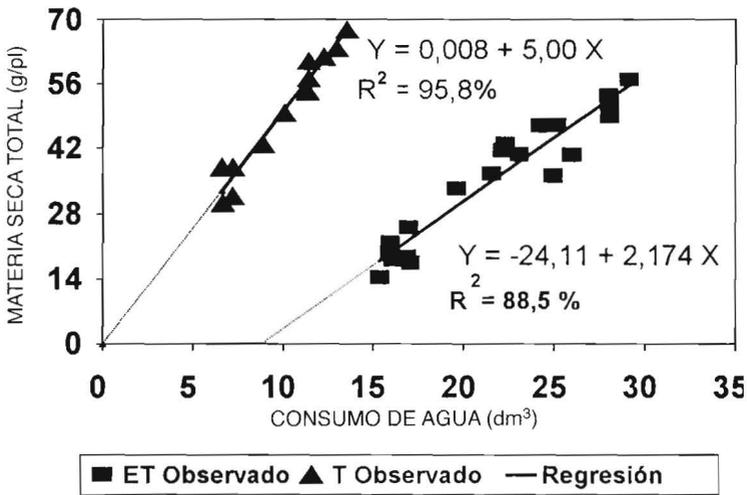


Figura 5. Rectas de regresión lineal entre la materia seca (g/pl) frente al agua consumida en ET y T. La ET estacional está comprendida desde siembra a madurez y la T es considerada desde nascencia a madurez

Figure 5. Simple linear regressions of dry matter (g/pl) against water use in ET and T. Seasonal ET includes water use from planting till maturity and seasonal T includes water use since emergence till maturity

valores de T de esta relación se sumó la T inicial estimada como el producto de los 37 días por la T media diaria en el inicio del cultivo. Este valor fue de $2,4 \text{ dm}^3$. Sumando este valor estimado de transpiración en este periodo (37 días) a la transpiración acumulada desde el comienzo de los tratamientos a la madurez fisiológica, se obtuvo la ecuación de la producción de materia seca total frente a la transpiración de la figura 5.

Se observa que la recta de regresión en el caso de la producción de materia seca total (MST) pasa prácticamente por el origen, con una ordenada en el origen, 0,008, no significativamente diferente de cero ($\alpha = 0,05$). La recta de regresión de la MST frente a la evapotranspiración (ET) presenta un desplazamiento a la derecha con respecto a la recta de regresión de la MST frente a

la transpiración (T) (figura 4). Estos resultados (en los que se incluye la transpiración estimada desde nascencia hasta el comienzo de los tratamientos) coinciden con los de HANKS *et al.* (1969). Se interpreta que este desplazamiento se debe a la evaporación del agua desde el suelo (HANKS, 1974).

Las funciones de producción de la materia seca total frente a la transpiración presentan unos coeficientes de determinación más altos que cuando se analizan frente a la ET estacional. Esto es previsible ya que la producción de materia seca de la parte aérea y la fotosíntesis están estrechamente relacionadas, así como la fotosíntesis y la transpiración. La transpiración relativa es un buen indicador de las cantidades relativas de intercambios gaseosos (CO_2 y H_2O)

que tienen lugar en la superficie foliar a través de los estomas.

Eficiencia del uso del agua (EUA)

El cuadro 6 muestra los valores de eficiencia del uso del agua (EUA) para los tratamientos del ensayo de ET y los de la eficiencia de transpiración (TE) para los tratamientos del ensayo de T.

Los valores medios de la eficiencia del uso del agua (EUA) para la producción de materia seca total variaron entre un máximo de 1,86, para el tratamiento más regado, y un mínimo de 1,17 para el tratamiento más estresado. Los valores medios de la EUA para el rendimiento en grano manifestaron una tendencia muy similar, obteniéndose el valor máximo de 0,73 en el tratamiento 2 y el mínimo de 0,19 en el tratamiento 5.

De esta forma, se advierte un descenso de la EUA tanto para la materia seca total como para el rendimiento en grano con el déficit hídrico. Esto queda confirmado por el análisis de varianza y la comparación de medias mediante el test de Duncan ($\alpha=0,05$) que indicó un descenso de la EUA en la materia seca total y en el rendimiento en grano con el aumento del estrés hídrico. Así, los tratamientos más regados (1, 2 y 3) fueron significativamente diferentes de los tratamientos más estresados (4 y 5), tanto para la materia seca como para el rendimiento en grano (cuadro 3).

BLUM *et al.* (1990) trabajando con diferentes genotipos de sorgo en condiciones similares a las de este ensayo, es decir cultivado en macetas en condiciones de invernadero, encontraron que la EUA media tanto para la producción de biomasa como para la del rendimiento en grano se redujo

CUADRO 6
EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (EUA) Y EFICIENCIA DE TRANSPIRACIÓN (TE) DE LA MATERIA SECA TOTAL Y DEL GRANO (EN g/kg DE AGUA EVAPOTRANSPIRADA Y TRANSPIRADA RESPECTIVAMENTE)

TABLE 6
WATER USE EFFICIENCY (EUA) AND TRANSPIRATION EFFICIENCY (TE) OF DRY MATTER AND GRAIN YIELD (IN g/Kg OF EVAPOTRANSPIRATION AND TRANSPIRATION RESPECTIVELY)

Tratamiento	EUA (g/kg ET)		TE (g/kg T)	
	Mat. seca	Grano	Mat. seca	Grano
1	1,86a	0,68a	4,94a	2,14a
2	1,71a	0,73a	—	—
3	1,82a	0,66a	5,04a	2,10a
4	1,33b	0,32b	—	—
5	1,17b	0,19b	5,03a	1,60a

* Valores seguidos de letras diferentes son significativamente diferentes al nivel de significación $\alpha = 0,05$.

con el estrés hídrico, siendo el porcentaje de reducción mayor en el caso del rendimiento en grano. Asimismo, encontraron que la EUA variaba entre los diferentes genotipos estudiados.

La eficiencia de transpiración (TE) de la materia seca total (g/Kg) se mantuvo prácticamente constante en todos los tratamientos del ensayo de T. La TE del rendimiento en grano tuvo una ligera disminución con el déficit hídrico pero el análisis de varianza mostró que no existieron diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) en la TE de la materia seca total y del rendimiento en grano, entre ninguno de los tratamientos (cuadro 6). Esto indica que existió una disminución similar tanto en el proceso de transpiración como en el de asimilación en los tratamientos deficitarios, quizás debido al cierre estomático que restringió ambos procesos. Hay que destacar los mayores valores de TE que los correspondientes valores de la EUA tanto de la materia seca como del rendimiento en grano, debido probablemente a la alta evaporación del agua del suelo en los contenedores del ensayo de ET.

AL-HAMDANI *et al.* (1991), en un ensayo con cuatro genotipos de sorgo cultivados en macetas en cámara de crecimiento, encontraron que la TE (expresada como la razón entre la asimilación neta de CO_2 y la transpiración) aumentaba cuando el potencial hídrico disminuía, aunque el análisis de varianza sólo detectó diferencias en la TE con respecto al estrés hídrico en uno de los cuatro genotipos estudiados. Estos autores observaron que una disminución del potencial hídrico afectaba más a la transpiración que a la asimilación de CO_2 . Aunque este hecho habría que tomarlo con cierta precaución, ya que tal como se ha indicado el análisis estadístico sólo encontró diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) en la TE entre

los tratamientos hídricos aplicados en uno de los genotipos considerados.

Conclusiones

Los resultados de este trabajo han permitido caracterizar la duración y los consumos de agua en los procesos de evapotranspiración (ET) y transpiración (T) en las diferentes etapas fenológicas establecidas en las plantas de sorgo sometidas a distintos suministros de riego. El déficit hídrico afectó al consumo de agua en todas las fases fenológicas del sorgo. Los valores máximos en todas las fases fenológicas se produjeron en el tratamiento más regado y los mínimos en el tratamiento menos regado. Las reducciones en los consumos de agua en ET en los tratamientos más deficitarios en las distintas fases fenológicas estuvieron comprendidas entre el 20% y el 65%. En el caso de la T estas reducciones variaron entre el 23% y el 74%.

Los valores máximos de ET y T en condiciones de invernadero se produjeron en las fases de zurrón hinchado y emergencia de la inflorescencia (etapas 5 y 6a), con unos consumos medios en el tratamiento más regado del orden de 347 y 190 cm^3/pl día, respectivamente. En el tratamiento menos regado estos consumos máximos fueron de 126 y 77 cm^3/pl día en ET y T respectivamente.

La producción de materia seca total y el rendimiento en grano de las plantas de sorgo cultivadas en condiciones de invernadero, se vieron muy afectadas por el déficit hídrico, produciéndose una mayor reducción del rendimiento en grano que de la materia seca, hecho que queda reflejado en la fuerte disminución del índice de cosecha

(IC). En el ensayo de ET el IC varió de 0,42 en el tratamiento 2 a 0,16 en el tratamiento 5. En el ensayo de T el IC varió entre 0,43 en el tratamiento 1 a 0,32 en el tratamiento 5.

La relación entre la producción de materia seca total y del rendimiento en grano seco de las plantas individuales de sorgo cultivadas en invernadero frente a la ET estacional fue de tipo lineal simple, con unos altos valores del coeficiente de determinación. Estos coeficientes de determinación fueron mayores en el caso de la materia seca que en el caso del rendimiento en grano. La relación entre la materia seca total y el rendimiento en grano frente a la transpiración también fue de tipo lineal simple, con mejores correlaciones que en el caso de las relaciones obtenidas frente a la ET.

Los resultados del trabajo indicaron que la eficiencia del uso del agua (EUA), tanto de la materia seca total como del rendimiento en grano de las plantas cultivadas en invernadero, solo se vio afectada significativamente a partir de un valor umbral de déficit hídrico. Se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos más regados (tratamientos 1, 2 y 3) y los tratamientos más deficitarios (tratamientos 4 y 5). La reducción de la EUA de la materia seca total y del rendimiento en grano respecto a los tratamientos más regados fue del 52% y del 74%, respectivamente.

La eficiencia de transpiración (TE), tanto de la materia seca total como del rendimiento en grano, no se vio afectada significativamente por el déficit hídrico. Los valores medios de la TE fueron de 5,0 g/Kg y de 1,9 g/Kg para la materia seca total y el rendimiento en grano, respectivamente.

Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA) por la concesión de una beca para la realización de tesis doctoral a M^a José Berenguer Merelo, en la que se incluye este trabajo, y por la financiación de los proyectos 8084, SC93-059 y SC93-057.

A Begoña Díaz del Cuvillo y Asunción Salvador por su colaboración en las tareas realizadas en el invernadero.

Bibliografía

- AL-HAMDANI S.H., MURPHY M., TODD G.W., 1991. Stomatal conductance and CO₂ assimilation as screening tools for drought resistance in sorghum. *Can. J. Plant Sci.*, 71:689-694.
- ARKLEY R.J., 1963. Relationships between plant growth and transpiration. *Hilgardia*, 34:559-584.
- BARRET J.W., SKOGERBOE, G.V., 1980. Crop production functions and the allocation and use of irrigation water. *Agric. Water Manag.*, 3:53-64.
- BEGG J.E., TURNER N.C., 1976. Crop water deficits. *Ard. Agronomy*, 28:161-217.
- BLUM A., RAMAIAH, S., KANEMASU E.T., PAULSEN G.M., 1990. The physiology of heterosis in Sorghum with respect to environmental stress. *Annals of botany*, 65:149-158.
- BRADFORD K.J., HSIAO T.C., 1982. Physiological responses to moderate water stress. In: *Physiological Plant Ecology. II: Water relations and carbon assimilation. Encyclopedia of plant physiology. New Series, Vol.12(d)*. Lange, O.L., Nobel, P.E., Osmond, C.B., Ziegler, H. (Eds.) Springer-Verlag, Berlin. 747 pp.
- COOPER P.J.M., 1983. Crop management in rainfed agriculture with special reference to water use efficiency. *Proceeding of the 17th Coll. International. Potash Institute Bern.*: 63-79.
- COOPER P.J.M., GREGORY P.J., 1987. Soil water management in the rainfed farming systems of the Mediterranean region. *Soil Use and Management*, 3(2): 57-62.

- DE WIT C.T., 1958. Transpiration and crop yields. Versl. Landbouk, Onderz. N° 64. Wageningen, The Netherlands.
- DONATELLI M., HAMMER G.L., VANDERLIP R.L., 1992. Genotype and water limitations effects on phenology, growth, and transpiration efficiency in grain sorghum. *Crop Sci.*, 32:781-786.
- DONE A.A., MYERS R.J.K., FOALE M.A., 1984. Responses of grain sorghum to varying irrigation frequency in the ord irrigation area. I Growth development and yield. *Aust. J. Agric. Res.*, 35:17-29.
- DOORENBOS J., KASSAM A.H., 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje, 33. FAO, Roma. 212 pp.
- DOORENBOS J., PRUITT, W.O., 1977. Crop water requirement's. FAO Irrigation and Drainage, Paper 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma. 144 pp.
- EASTIN T.D., HULTQUIST, T.H., SULLIVAN, C.Y., 1973. Physiological maturity in grain sorghum. *Crop Sci.*, 13:175-178.
- FACI J.M^a, 1986. Respuesta de los cultivos de sorgo y trigo a un suministro variable de agua de riego. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, 238 pp.
- FACI J.M^a, ARAGÜES, R., QUILEZ D., 1988. Estudios para la mejora de la eficiencia del riego en un polígono de riego del Valle del Ebro. *Riegos y Drenajes XXI*, 20:35-42.
- FACI J.M^a y BERCERO A., 1989. Estrategias frente a la sequía. *Surcos de Aragón*, 15:16-19.
- FACI J.M^a, FERERES E., 1980. Responses of grain sorghum to variable water supply under two irrigation frequencies. *Irrig. Sci.*, 1:149-159.
- FISCHER R.A., 1980. Influence of water stress on crop yield in semid arid regions. In: *Adaptation of plants to water and high temperature stress*. p. 323-340. Turner, N.C., Kramer, P. (Eds.) Wiley and Son, New York, U.S.A.
- GARDNER W.R., BLAD B.L., GARRITY, D.P., WATTS D.G., 1981. Relationships between crop temperature, grain yield, evapotranspiration and phenological development in two hybrids of moisture stressed sorghum. *Irrigation Sci.*, 2:213-224.
- GARRITY D.P., WATTS D.G., SULLIVAN C.Y., GILLEY J.R., 1982. Moisture deficits and grain sorghum performance: Evapotranspirationyield relationships. *Agronomy J.*, 74:815-820.
- HANKS R.J., 1974. Model for predicting plant growth as influenced by water use. *Agron. J.*, 66:660-665.
- HANKS R.J., 1983. Yield and wateruse relationships: An overview. In: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (Eds.). "Limitations to efficient water use in crop production". *Am. Soc. Agron., U.S.A.*: 393-411.
- HANKS R.J., GARDNER H.R., FLORIAN R.L., 1969. Plant growth evapotranspiration relations for several crops in the Central Great Plains. *Agron. J.*, 61:3034.
- HANKS R.J., RASMUSSEN V.P., 1983. Crop production and plant water stress. *Avd. Agron.*, 35:193-215.
- HOOKE M.L. 1985. Grain sorghum yield and yield component response to timing and number of irrigations. *Agron. J.*, 77:810-812.
- HOWELL, T.A., MUSICK J.T., 1985. Relationship of dry matter production of field crops to water consumption. Les besoins en eau des cultures. Conférence internationale, Paris, 11-14 sept. 1984. INRA. Paris, 247-269.
- IGARTUA, E., 1990. Análisis genético de caracteres de valor agronómico en sorgo para grano (*Sorghum bicolor* L. Moench). Tesis Doctoral. Univ. País Vasco. 245 pp. Inédita.
- KRIEG D.R., LASCANO R.J., 1990. Sorghum. pp. 719-789. In: *Irrigation of agricultural crops*. Stewart, B.A. & Nielsen, D.R. (Eds). *Agronomy n° 30*. Am. Soc. of Agronomy. Madison, Wisconsin, U.S.A.
- LEWIS R.B., HILER E.A., JORDAN W.R., 1974. Susceptibility of grain sorghum to water deficit at three growth stages. *Agron. J.*, 66:589-591.
- MARTÍN J.H., LEONARD W.H., STAMP D.L., 1976. *Principles of field crop production*. McMillan, New York, U.S.A. 1118 pp.
- STEWART J.I., HAGAN R.M., 1973. Functions to predict effects of crop water deficits. *J. Irrig. Drain. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 99:421439.
- STEWART J.I., MISRA R.D., PRUITT W.O., HAGAN R.M., 1975. Irrigating corn and grain sorghum with a deficient water supply. *Transactions of ASAE*: 270-280.
- VANDERLIP R.L., REEVES H.E., 1972. Growth stages of Sorghum (*Sorghum bicolor*, (L.) Moench). *Agronomy J.*, 64:13-16.

(Aceptado para publicación el 16 de noviembre de 1998)