Rev. Fitotec. Mex. Vol. 23. 321-334. 2000

PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN LÍNEAS DE SORGO COMO RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO

BIOMASS PRODUCTION IN SORGHUM LINES IN RESPONSE TO DROUGHT STRESS

Sergio Castro Nava[1], Joaquín Ortíz Cereceres[1], María del Carmen Mendoza Castillo[1] y Francisco Zavala García[2]

RESUMEN

Esta investigaciòn tuvo como objetivo caracterizar 29 genotipos de sorgo por su respuesta al estrés hídrico, utilizando como criterios principales de selección, la producción de biomasa y el rendimiento de grano; así como el estudio de la asociación entre estos caracteres y otros parámetros fisiológicos. El estudio se estableció en Cd. Victoria, Tam., bajo condiciones de riego y sequía en bolsas de polietileno durante 1996. La sequía se aplicó en la diferenciación floral hasta que se alcanzó el punto de marchitez permanente (PMP) del suelo en cada uno de los genotipos. Se tomaron datos del crecimiento y fisiológicos al inicio y al final de la sequía así como a la cosecha. Los resultados indican que durante el periodo de sequía el crecimiento de la parte aérea disminuyó y se estimuló el de la parte radical, no encontrando diferencias en la biomasa total entre condiciones de humedad, debido a un efecto de compensación. Los genotipos bajo sequía, en promedio, respondieron con una mayor acumulación de biomasa radical que representó 44% de la biomasa total. Además, una mayor capacidad de acumular biomasa durante el periodo de recuperación a la sequía se reflejó en un alto rendimiento de grano. Los genotipos clasificados como resistentes a sequía produjeron más grano bajo sequía debido a una mayor longitud de panoja, un mayor número de días a floración y una mayor área foliar activa durante el periodo de recuperación. La resistencia a la sequía podría estar dada por la capacidad de producir biomasa durante el estrés hídrico y durante el periodo de recuperación, más que por cambios en el estado hídrico de la planta, así como por la habilidad de mantener un nivel apropiado del rendimiento de grano y un alto índice de cosecha. La clasificación de genotipos en función de su capacidad de producción de biomasa junto con el rendimiento de grano como respuesta al estrés hídrico, es un criterio de utilidad en el mejoramiento para la resistencia a la sequía en sorgo. De acuerdo con los criterios de selección establecidos 10 genotipos fueron clasificados como resistentes, nueve como intermedios y 10 como susceptibles, de éstos, dos genotipos resistentes UAT 124 y UAT 152 y uno susceptible UAT 30 fueron seleccionados para estudios posteriores.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES

Sorghum bicolor (L.) Moench, sequía, biomasa radical, acumulación de biomasa, criterio de selección.

SUMMARY

Twenty nine sorghum genotypes were characterized with respect to drought stress responses using biomass production and grain yield as basis criteria, as well as their relationship between their response to drought and physiological traits. The study was carried on at Cd. Victoria, Tam. under well watered and drought stress conditions during 1996. The genotypes were subjected to drought stress from panicle initiation until the soil reached the permanent wilting point (PWP). Data were recorded at the beginning and the end of drought and at harvest. During the drought period it was a delay in shoot growth and an increase in root growth, however there were not differences in total biomass production between soil moisture conditions, due probably to compensation effects. The root biomass represented 44 % of the

1 Instituto de Recursos Genéticos y Productividad del Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carret. México-Texcoco. C.P. 56230 Montecillo, Estado de México. Tel. y Fax: 01(595) 2-0200 Ext. 1530 y 2-0262.

2 Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Apdo. Postal 358, San Nicólas de los Garza, N.L. C.P. 66450. Tel. y Fax: 01(824) 8-0101 y 8-0259.

Fecha de Recepción: 23 de Febrero de 1999.
Fecha de Aprobación: 23 de Mayo del 2000.

total biomass under stress. Furthermore, there was an association between high biomass accumulation during the drought recovery period and high grain yield. The high grain yield obtained under water stress in resistant genotypes was associated with greater panicle length, days to flower more, and a greater active leaf area during the recovery period. It is considered that drought resistance in the sorghum genotypes studied, was due to their biomass production capacity during drought stress and recovery periods, but not to changes in the water condition of the plant, as well as to ability to maintain a high grain yield and harvest index under stress conditions. Biomass production and grain yield in response to water stress may be useful criteria in sorghum breeding programs for drought resistance. According to the selection criteria utilized, 10 genotypes were classified as resistant, nine as intermediate and 10 as susceptible, of those, two resistant genotypes UAT 124 and UAT 152 and one susceptible UAT 30 were selected for further studies.

ADDITIONAL INDEX WORDS

Sorghum bicolor (L.) Moench, drought, radical biomass, dry matter accumulation, selection criterion.

INTRODUCCIÓN

La sequía es un fenómeno atmosférico que afecta la producción agrícola (Pospisilova, 1992) y el bienestar de millones de personas en el mundo (Turner, 1997). Esto es importante en países dependientes de la lluvia para la producción agrícola, en donde el uso de cultivares mejorados por su resistencia a la sequía es una opción viable para enfrentar este problema (Bolaños y Edmeades, 1993).

En los programas de mejoramiento de la resistencia a la sequía, se tiene el problema de definir los criterios de selección, ya que la utilización del rendimiento *per se* bajo estrés por falta de humedad como criterio principal para la selección de genotipos resistentes es inapropiado, debido a que la resistencia o tolerancia a este factor adverso se encuentran influenciadas por un gran número de caracteres fisiológicos y bioquímicos (Ludlow y Muchow,1990; Fukai y Cooper, 1995; Turner, 1997); sin embargo, muy pocos han sido probados por su influencia en el rendimiento o en la sobrevivencia de las plantas. Aunque en años recientes se ha propuesto el uso de criterios fisiológicos en el proceso de selección para resistencia a la sequía, es necesario todavía tener un mejor entendimiento de la asociación entre los procesos fisiológicos y bioquímicos con el rendimiento de las plantas bajo estrés, así como también desarrollar métodos de prueba expeditos (Blum *et al.*, 1989). De acuerdo con lo anterior, el objetivo de esta investigación fue caracterizar 29 genotipos de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) por su respuesta a la sequía, utilizando como criterios principales de selección la producción de biomasa y el rendimiento de grano; así como el estudio de la asociación entre estos caracteres y otros parámetros de tipo fisiológico.

REVISIÓN DE LITERATURA

La resistencia o tolerancia a la sequía debiera ser expresada en términos de la habilidad de la planta para mantener bajo estrés el rendimiento de grano y sus componentes por panoja, así como una producción de biomasa e índice de cosecha altos (Fussell *et al.*, 1991). Se ha demostrado que la acumulación de biomasa es un buen indicador del efecto del estrés hídrico durante períodos prolongados; sin embargo, este criterio debe considerarse con cuidado, ya que bajo un estrés hídrico severo durante períodos cortos, la producción de grano puede disminuir considerablemente y mantenerse la producción de biomasa en los órganos vegetativos (Bolaños *et al.*, 1993).

En trigo (*Triticum aestivum* L.) (Morgan, 1991) y en sorgo (Ludlow *et al.*, 1990) se han encontrado efectos positivos de la sequía sobre la biomasa y el rendimiento de grano, atribuidos a altos niveles de ajuste osmótico. En la última especie bajo estrés hídrico se

tuvo una longitud de raíz 29 % mayor que en riego, así como una mayor producción de biomasa a la antesis y, como consecuencia, un rendimiento de grano 24 % más alto. Por el contrario, también se informan efectos negativos de la sequía sobre la producción de biomasa en cebada (*Hordeum vulgare* L.) (Jamieson *et al.*, 1995) y arroz (*Oryza sativa* L.) (Lilley y Fukai, 1994), y sobre el rendimiento de grano en sorgo (Sankarapandian *et al.*, 1993). Sin embargo, queda claro que el efecto de la sequía depende del momento en que ésta ocurra (Jamieson *et al.*, 1995; Boonjung y Fukai, 1996); de su duración (Blum et al., 1989); de su severidad, así como del cultivar (Lilley y Fukai, 1994). En sorgo, un estrés hídrico durante la floración y el período de llenado de grano, afecta severamente el rendimiento de grano pero no cuando el estrés ocurre en la fase vegetativa (Sankarapandian *et al.*, 1993).

Blum (1988) encontró incrementos de la biomasa total, reflejado esto en aumentos del índice de cosecha (IC) y el rendimiento de grano; mientras que Craufurd y Peacock (1993) señalan que las variaciones en el rendimiento de grano observadas en sorgo, estuvieron asociadas con la biomasa total más que con el IC. En maíz (Sinclair *et al.*, 1990) un estrés de humedad severo en la antesis redujo el rendimiento de grano en mayor proporción que la biomasa total debido a que ésta fue la etapa donde existió la máxima tasa de acumulación de biomasa y el mayor consumo de agua, por lo que un déficit hídrico causa una reducción en la acumulación de biomasa, afectando directamente al rendimiento de grano.

Para mejorar la resistencia a la sequía en maíz, Bolaños y Edmeades (1993) utilizaron un índice de selección formado por el rendimiento de grano y caracteres morfológicos y fisiológicos, el cual no tuvo efecto sobre la producción de biomasa pero sí en el rendimiento de grano, debido principalmente a ganancias en el IC.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron 29 genotipos de sorgo para grano, de los cuales 26 fueron líneas experimentales de diferentes programas de mejoramiento, en su mayoría caracterizadas por su respuesta a la sequía y tres híbridos comerciales recomendados para siembras de temporal en el Estado de Tamaulipas.

El estudio se hizo en el vivero de la Unidad Académica Multidisciplinaria "Agronomía y Ciencias" de la Universidad Autónoma de Tamaulipas en Cd. Victoria, Tam. (23° 44′ LN y 99° 08′ LO) durante el verano de 1996. La siembra se realizó el 23 de mayo de 1996, en bolsas de polietileno utilizando 15 kg de suelo seco, cuya capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) fueron de 35.2 y 17.6 % en cada caso. Se aplicaron dos tratamientos de humedad (TH): riego y sequía. En el tratamiento de riego la CC del suelo se mantuvo por encima del 80 % durante todo el ciclo, mientras que el tratamiento de sequía consistió en suspender el riego en el momento de la diferenciación floral de cada genotipo hasta que se alcanzó el PMP, momento en el cual se dio un riego de recuperación hasta alcanzar la CC manteniéndola arriba del 80 % hasta el fin del ciclo.

Para la caracterización de los genotipos de sorgo se consideró la utilización de características del crecimiento como la producción de biomasa aérea (BA), radical (BR) y total (BT) y el rendimiento de grano (RG). Además se utilizaron otras características como área foliar (AF), número de hojas liguladas (NHL) y la relación BR/BT. Se estudió el estado hídrico de cada uno de los genotipos mediante las variables fisiológicas siguientes: potencial hídrico (Ψ) y sus componentes

potencial osmótico (Ψ_s) y potencial de presión (Ψ_p); contenido relativo de agua (CRA); transpiración (Tr); temperatura de la hoja (Th) y la conductancia estomática (CE). De las características bioquímicas se consideró la cantidad de ceras epicuticulares (CCE) por el método colorimétrico (Ebercon *et al.*, 1977). Las características anteriores se evaluaron al inicio del tratamiento de sequía (IS), al final del mismo (FS) y a la cosecha (C). En este último muestreo, además de las anteriores, se evaluó el rendimiento de grano por panoja (RG); la altura de planta (AP); la longitud de la panoja (LP); los días a floración (DF) y se calculó el índice de cosecha (IC).

La clasificación de genotipos en resistentes, intermedios y susceptibles se hizo de acuerdo con los siguientes criterios: Como genotipos resistentes se consideraron los que al final del período de sequía (FS) proporcionalmente acumularon mayor BA, BR y BT bajo la condición de sequía en relación a los de riego y los que durante el período de crecimiento posterior a la sequía y hasta la cosecha (C) mantuvieron o superaron este comportamiento, además de que presentaron alto RG. Por el contrario, como genotipos susceptibles se consideraron a los que tuvieron los menores incrementos de BA, BR, BT y RG bajo sequía y que tuvieron una baja capacidad de recuperación después del estrés hídrico; el resto de los genotipos se consideraron como intermedios.

La distribución de los tratamientos se hizo bajo un diseño completamente aleatorio con dos repeticiones, considerando como unidad experimental una planta por maceta. Se hizo un análisis de varianza factorial para cada carácter y para cada uno de los muestreos realizados de acuerdo con el diseño utilizado. Las comparaciones de medias se realizaron mediante la prueba de Tukey (α= 0.05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se observa que al final del tratamiento de sequía (FS) se tuvieron diferencias significativas entre genotipos (G) solamente en el caso de la BA. En cambio las diferencias entre tratamientos de humedad (TH) fueron altamente significativas para BA, BR y la relación BR/BT, mientras que la interacción G x TH sólo fue significativa para la BT. A la cosecha (C) las diferencias entre los genotipos fueron más evidentes, observándose diferencias altamente significativas para BT, BA, BR y la relación BR/BT; en cambio, las diferencias en TH fueron altamente significativas en la BT y BR, mientras que la interacción G x TH resultó significativa en BT y altamente significativa en BA. Para el RG se observaron diferencias altamente significativas para genotipos y la interacción G x TH.

Los resultados indican que los genotipos estudiados respondieron de manera particular tanto al tratamiento de estrés hídrico como después del riego de recuperación, lo cual se reflejó en su expresión diferencial de los caracteres evaluados.

Como respuesta promedio de los 29 genotipos, en el Cuadro 2 se observa que la acumulación de la BT durante el período de sequía fue muy similar en ambos tratamientos de humedad (16.3 y 17.7 g.pta.$^{-1}$ para riego y sequía, respectivamente), lo que indica que este carácter fue poco afectado por el estrés hídrico en esa etapa. La BA al final del tratamiento de sequía mostró un claro efecto del estrés hídrico, ya que en esta condición fue 19 % menor que en riego y representa un incremento de sólo 2.73 veces con relación al inicio de la sequía. Para el mismo período, la BR fue 65 % mayor en el tratamiento de sequía comparada con el de riego, lo cual también es reportado por Parsons (1982) y Ludlow y Muchow (1990); es decir,

el incremento de la BR bajo sequía fue 0.88 veces mayor que el observado bajo la condición de riego, lo cual evidencia que la principal respuesta de los genotipos al estrés hídrico fue un incremento de la BR.

Por lo anterior, resulta claro que el estrés hídrico causó una disminución en el crecimiento de la parte aérea y un estímulo en el de la parte radical, aunque éstos fueron de diferente magnitud. Este comportamiento bajo sequía ha sido reportado por Blum y Arkin (1984) y Sharp (1994). Esto es particularmente importante bajo sequía, ya que al tener un mayor crecimiento de la raíz, las plantas explorarían mayor volúmen del suelo y por lo tanto se podría aumentar la tasa de absorción de agua. Sin embargo, de acuerdo con Sharp *et al.* (1990) el crecimiento en la raíz a bajos potenciales hídricos involucra un complejo patrón de eventos morfogénicos y metabólicos lo cual dificulta la interpretación del comportamiento de la BR señalado.

Para la relación BR/BT, se puede ver que al final del tratamiento de sequía la proporción de la BT representada por la BR en el tratamiento de sequía fue de 44 %, mientras que en el tratamiento de riego sólo representó 28 %. La diferencia en la BT, observada entre los dos tratamientos de humedad, se podría explicar por efectos de compensación entre la BA y BR.

Durante el período de recuperación, comprendido desde el término de la sequía hasta la cosecha, la acumulación promedio de BT de los genotipos fue diferente para los dos tratamientos de humedad (176.0 y 139.3 $g.pta^{-1}$ para riego y sequía, respectivamente), es decir, la sequía redujo 17 % la acumulación de BT. La BA tuvo una notable recuperación en los genotipos sometidos a la sequía ya que a la cosecha el promedio de ésta fue similar para riego y sequía (93.3 y 93.6 $g.pta^{-1}$ respectivamente).

En cuanto a la BR acumulada desde el término de la sequía hasta la cosecha en los genotipos sometidos a sequía, ésta se redujo 32 % en comparación con el tratamiento de riego, lo cual indica que el incremento de la BR después del riego de recuperación fue menor que el que se tuvo bajo riego.

Cuadro 1. Resultados de los análisis de varianza para cada una de las variables al final del tratamiento de sequía (FS) y a la cosecha (C) y el rendimiento de grano en 29 genotipos de sorgo para grano bajo dos tratamientos de humedad.

F. V.	GL	BT[1]		BA		BR		BR/BT		RG
		FS	C	FS	C	FS	C	FS	C	
G	28	NS[2]	**	*	**	NS	**	NS	**	**
TH	1	NS	**	**	NS	**	**	**	NS	NS
G x TH	28	*	*	NS	**	NS	NS	NS	NS	**
Error	58									
Total	115									
C.V. (%)		32.9	33.4	31.7	25.8	58.5	60.1	32.5	29.7	33.7

BT= Biomasa total; BA= Biomasa aérea; BR= Biomasa de raíz; BR/BT= Relación biomasa de raíz/biomasa total; RG= Rendimiento de grano; G= Genotipos; TH= Tratamientos de humedad; G x TH= Interacción G x TH.

[2] NS= No significativo, α=0.05; *= Significativo, α= 0.05; **= Altamente significativo, α= 0.01.

Cuadro 2. Promedios de las variables estudiadas, cambios de las mismas entre muestreos e incrementos de biomasa de 29 genotipos de sorgo para grano en tres muestreos bajo riego y sequía.

Variable	Tratamiento de humedad	Muestreos			Cambio		
		IS[1]	FS	C	C-FS	FS/IS	C/FS
BT (g.pta^{-1})	Riego	11.9a[2]	28.2a	204.2a	176.0	2.37	7.24
	Sequía	11.9a	29.6a	168.9b	139.3	2.49	5.71
BA (g.pta^{-1})	Riego	6.0a	20.2a	93.3a	73.1	3.37	4.62
	Sequía	6.0a	16.4b	93.6a	77.2	2.73	5.71
BR (g.pta^{-1})	Riego	5.9a	8.0a	110.7a	102.7	1.36	13.84
	Sequía	5.9a	13.2b	75.3b	62.1	2.24	5.70
BR/BT	Riego	0.48a	0.28a	0.52a	0.24		
	Sequía	0.48a	0.44b	0.45a	0.01		
RG (g.pta^{-1})	Riego			37.02a			
	Sequía			36.07a			
IC	Riego			0.18a			
	Sequía			0.21a			

[1] IS= Inicio de la sequía; FS= Final de la sequía; C= Cosecha; BT= Biomasa total; BA= Biomasa aérea; BR= Biomasa radical; BR/BT= Relación biomasa radical/biomasa total; RG= Rendimiento de grano; IC= Índice de cosecha.

[2]Promedios con la misma letra entre condiciones y para cada variable son estadísticamente iguales (Tukey, α=0.05).

Se puede observar también en el Cuadro 2 que a la cosecha en el tratamiento de sequía, la relación BR/BT se mantuvo a un nivel similar (45 %) al que tuvo al final de la sequía, no así en el tratamiento de riego, en donde la proporción de BR casi se duplicó en comparación al nivel que tuvo al final de la sequía al pasar de 28 a 52 %.

Mediante la relación entre la biomasa acumulada al momento de la cosecha, con la existente al final de la sequía (C/FS), se puede ver que la BA, BR y BT aumentaron en una proporción similar (5.7 veces) durante el período de recuperación. Es necesario notar que en el caso de riego, el incremento de la BR fue de más del doble del que se tuvo en sequía. Aunque proporcionalmente estos incrementos fueron de la misma magnitud, el aumento de la BA (Cuadro 2) tanto en riego como en sequía, fue similar (73.1 y 77.2 g respectivamente). La BR se incrementó en 102.7 g en el tratamiento de riego, mientras que en el de sequía éste fue de sólo 62.1 g.

Por otra parte, el RG en promedio no fue modificado por efecto del estrés hídrico, ya que este carácter tuvo promedios similares (37.02 y 36.07 g.pta^{-1} para riego y sequía respectivamente), lo cual fue reflejado también en el IC (0.18 y 0.21 para riego y sequía, respectivamente).

La respuesta individual de los genotipos para cada una de las variables, se analizó a través de la relación S/R al final de la sequía (FS) y a la cosecha (C). En el Cuadro 3 se observa que al final de la sequía, nueve genotipos produjeron más BA bajo estrés, presentando incrementos entre 5 y 54 % en relación a riego, lo cual podría permitir una recuperación más rápida después de eliminada la sequía, aportando más asimilados como lo señalaron Fukai y Cooper (1995); el resto de los genotipos por el contrario tuvieron

reducciones de la BA que variaron entre 8 y 59 %. A la cosecha, los genotipos con mayor BA bajo sequía, aumentaron a 12, con incrementos entre 2 y 81 %, mientras que el resto la redujo entre 5 y 62 %. Cabe destacar que, de los nueve genotipos que al término del tratamiento de sequía tuvieron mayor BA, sólo cuatro mantuvieron este comportamiento a la cosecha (NLNE 10351, LRB 210, UAT 152 y UAT 124). En el caso de la BR al final de la sequía, 24 genotipos presentaron incrementos entre 14 y 465 % en relación al tratamiento de riego, mientras que sólo cinco la redujeron entre 5 y 67 %; sin embargo, este comportamiento de la BR no se mantuvo después del riego de recuperación, ya que a la cosecha sólo 12 de 24 genotipos que el final de la sequía, tuvieron mayor BR, presentaron incrementos en este carácter entre 10 y 103 %, mientras que el resto tuvieron reducciones entre 15 y 77 %. De los 12 genotipos que bajo sequía tuvieron más BR a la cosecha, 10 de ellos (83 %) también mostraron este comportamiento al final del período de estrés hídrico. Con base en lo anterior, se puede señalar que, de manera general, el estrés hídrico provocó un incremento de la BR; sin embargo, el nivel de este incremento también dependió del genotipo. Este tipo de respuesta también fue reportada por Gardner *et al.* (1985).

Por otra parte, sólo 15 genotipos de los 29 estudiados respondieron a la condición de estrés incrementando la BT entre 6 y 139 % en relación a la de riego al final de la sequía; el resto presentaron reducciones de este carácter entre 1 y 60 %; en cambio, a la cosecha sólo siete de los 11 genotipos que mostraron incrementos de BT al final de la sequía, también los mostraron a la cosecha.

La respuesta del RG al estrés hídrico, también varió entre genotipos, ya que 12 de ellos mostraron incrementos en el tratamiento de sequía en relación al de riego entre 1 y 108 %, mientras que 15 presentaron reducciones de este carácter entre 1 y 62 %. De los 12 genotipos que incrementaron su RG bajo sequía, sólo seis tuvieron rendimientos iguales o superiores al promedio general (NLNE 10351, NLNE SEP 77, UAT 125, UAT 24, UAT 124 y UAT 152) bajo esta condición. Los genotipos NLNE 10351 y UAT 152 además de su alto rendimiento mantuvieron un mayor promedio de BA, BR y BT bajo condición de sequía; es decir que la relación S/R siempre fue mayor que la unidad. Los genotipos NLNE 10351 y UAT 124 redujeron el IC en el tratamiento de sequía en comparación con el de riego, mientras que el resto lo incrementaron. Los genotipos NLNE 10351 y NLNE SEP 77 tuvieron un IC bajo de 0.18 y 0.19, respectivamente, lo cual se atribuye a que son de porte alto. El resto de los genotipos tuvieron un IC que fluctuó entre 0.27 y 0.41.

En función del comportamiento de los genotipos en las variables anteriores y de acuerdo con los criterios de clasificación establecidos, en el Cuadro 4 se presenta la clasificación de los genotipos en resistentes, intermedios y susceptibles.

De todas las variables en estudio (Cuadro 5), el efecto de la sequía fue más importante sobre la BR, ya que los tres tipos de genotipos (resistentes, intermedios y susceptibles) tuvieron incrementos durante el período de estrés de 48, 40 y 124%, respectivamente; sin embargo, a la cosecha en el tratamiento de sequía los genotipos resistentes en promedio acumularon más biomasa en la raíz (98.88 $g.pta^{-1}$) que los susceptibles (23.46 $g.pta^{-1}$).

Por otra parte, la BA se redujo por efecto del estrés hídrico en 17 %, tanto en los resistentes como en los susceptibles. En cambio a la cosecha se observó una recuperación

Cuadro 3. Relación sequía/riego (S/R) para la biomasa aérea, biomasa radical, biomasa total y el rendimiento de grano en 29 genotipos de sorgo para grano al final de la sequía y a la cosecha.

Genotipo	Variable						
	BA[1]		BR		BT		RG
	FS	C	FS	C	FS	C	
NLNES4B	0.89	0.88	3.33	0.42	1.49	0.58	0.90
NLNEPP 290	0.93	0.38	1.23	0.26	0.99	0.33	0.42
NLNE 10351	1.42	1.81	1.94	1.14	1.59	1.63	1.13
NLNESEP 77	0.65	1.35	1.14	1.13	0.80	1.26	1.68
LRB 210	1.46	1.24	3.57	0.46	2.09	0.62	¶
LRB 216	1.05	0.87	3.04	0.48	1.72	0.62	1.10
LRB 208	1.15	0.67	1.47	0.67	1.26	0.67	0.79
LRB 118B	1.46	0.89	5.65	0.23	2.39	0.52	1.06
VA 110	0.66	0.80	1.90	0.85	0.90	0.83	1.35
TF UACH 3	1.12	0.85	2.14	0.33	1.41	0.51	0.67
UAT 134	0.59	0.47	1.75	0.43	0.89	0.45	¶
UAT 119	0.93	1.37	2.80	1.10	1.37	1.25	1.01
UAT 30	0.63	0.56	0.87	0.54	0.71	0.55	0.51
UAT 129	0.81	0.59	3.41	0.25	1.26	0.37	0.57
UAT 124	0.91	1.02	2.61	1.47	1.27	1.20	0.99
UAT 125	0.70	1.23	1.23	0.39	0.84	0.68	1.81
UAT 24	0.55	0.84	1.47	1.00	0.82	0.91	2.08
UAT 152	1.06	1.20	2.26	1.32	1.40	1.25	1.42
RTX 430	0.70	0.95	0.48	0.30	0.60	0.55	0.82
BTX 623	0.43	1.28	0.37	2.03	0.40	1.46	0.82
UAT 256	0.43	1.26	1.54	0.47	0.62	0.71	1.63
UAT 222	0.51	0.91	1.63	0.51	0.76	0.68	0.38
UAT 244	1.44	1.06	3.82	0.31	1.86	0.56	0.91
UAT 268	0.66	0.90	1.21	1.64	0.78	1.26	1.17
UAT 118	0.92	1.09	3.07	1.70	1.44	1.30	0.99
UAT 150	0.41	1.39	0.95	1.25	0.54	1.33	1.14
PIONEER 8313	1.54	0.76	2.24	1.20	1.73	1.03	0.86
PIONEER 8310	0.83	0.83	1.84	1.78	1.06	1.17	0.56
PIONEER 8358	0.58	0.72	0.33	0.81	0.45	0.78	0.58
Promedio	0.81	1.00	1.65	0.68	1.05	0.83	0.97

[1]BT= Biomasa total; BA= Biomasa aérea; BR= Biomasa radical; RG= Rendimiento de grano; FS= Final de la sequía; C= Cosecha.

¶ = Datos perdidos

de los resistentes comparado con los susceptibles, ya que éstos tuvieron 20 % más BA en la condición de sequía comparado con riego; mientras que los susceptibles sufrieron una reducción del 24 %.

El comportamiento de la BA y BR en el grupo de resistentes durante el período de recuperación, se vio reflejado en la BT que fue 4 % mayor bajo la condición de sequía, en comparación con riego; así mismo el grupo de susceptibles presentó en promedio 45 % menor BT. Por otra parte, el RG promedio del grupo de genotipos resistentes fue dos veces más alto que el de los susceptibles.

Los resultados anteriores demuestran que los genotipos clasificados como resistentes tuvieron mejor capacidad de recuperación después de que se alivió la sequía, así como también mayor capacidad de retención de hojas activas (senescencia foliar retrasada) durante más tiempo (Cuadro 5), lo cual concuerda con lo señalado por Lilley y Fukai (1994), ya que la fotosíntesis continúa por más tiempo y por lo tanto hay fotoasimilados disponibles que redundan en mayor rendimiento de grano como lo señalan Bolaños *et al.* (1993).

En el Cuadro 6 se presentan los caracteres fisiológicos estudiados al final de la sequía, se puede observar que en los tres grupos de genotipos (resistentes, intermedios y susceptibles), el Ψ, Ψ_s, Ψ_p, CE, Tr y CRA fueron reducidos por el estrés hídrico en comparación con la condición de riego, mientras que la temperatura de la hoja fue incrementada. El Ψ_p de los grupos resistente y susceptible tuvieron valores que indican un mantenimiento de la turgencia, la cual refleja una acumulación de solutos (0.23 y 0.32 MPa, respectivamente), lo que no sucedió en el grupo de intermedios (-0.05 MPa). Estas respuestas en los cambios del Ψ_s y por consiguiente del Ψ_p coinciden con lo encontrado por Turner y Jones (1980), Ludlow y Muchow (1990) y Turner (1997). En el caso de la CCE en los tres grupos se tuvieron valores muy similares en las dos condiciones de humedad; sin embargo, aunque se observó incremento del 20 % por efecto del estrés hídrico en los grupos resistente y susceptible, lo cual coincide con lo encontrado por Castro y Huerta (1994), no es posible determinar la relevancia de esta pequeña diferencia

Es importante hacer notar que bajo la condición de sequía, se encontró que los promedios de todas las características fisiológicas fueron muy similares entre el grupo de resistentes y el de los susceptibles. Además en ambos grupos, sólo hubo diferencias entre riego y sequía en Th y Tr (Cuadro 6).

Para los genotipos resistentes, el déficit hídrico no ocasionó reducciones en la BT pero sí en la BA, lo cual estuvo relacionado con las reducciones del AF, Tr y CE; mientras que la BR se incrementó por efecto de la sequía (Cuadro 5), lo cual les permitió tener una mayor eficiencia en la extracción de agua y un mejor grado de hidratación de la planta.

Lo anterior indica que la resistencia a la sequía en estos genotipos podría estar dada por la capacidad de producir biomasa durante el estrés y en el período de recuperación, más que por cambios en el estado hídrico de la planta como lo mencionan Bolaños *et al.* (1993), así como también por la habilidad de mantener un nivel apropiado del RG por panoja y un alto IC como lo señalan Fussell *et al.* (1991).

De acuerdo con el objetivo de esta investigación y en función del comportamiento descrito de los genotipos y considerando los de fenología similar, se definieron los genotipos resistentes UAT 124 y UAT 152 y uno susceptible UAT 30 (Cuadro 7) para su estudio más detallado.

En el Cuadro 7 se puede notar que los genotipos clasificados como resistentes tuvie-

Cuadro 4. Grupos de genotipos clasificados en función de la capacidad de acumulación de biomasa y el rendimiento de grano como respuesta al estrés hídrico.

Grupo		
Resistentes	Intermedios	Susceptibles
NLNE 10351	LRB 216	NLNES4B
NLNESEP 77	VA 110	NLNEPP 290
LRB 210	TF UACH 3	LRB 118B
LRB 208	RTX 430	UAT 134
UAT 124	UAT 118	PIONEER 8310
UAT 125	UAT 222	UAT 119
UAT 24	UAT 150	UAT 129
UAT 152	PIONEER 8313	UAT 256
BTX 623	PIONEER 8358	UAT 30
UAT 268		UAT 244

Cuadro 5. Promedios de las variables estudiadas en dos muestreos en cada uno de los grupos formados para la condición de riego (R) y sequía (S).

Variables	Muestreo	Grupo					
		Resistentes		Intermedios		Susceptibles	
		R	S	R	S	R	S
BA[1] (g)	FS	20.72	17.19	18.80	14.54	20.61	17.10
	C	120.74	144.61	82.33	76.26	77.24	58.56
BR (g)	FS	9.02	13.36	8.72	12.24	6.23	13.99
	C	126.86	112.24	114.12	73.40	98.13	37.45
BT (g)	FS	29.74	30.55	27.52	26.78	26.84	31.09
	C	247.10	256.85	196.45	149.66	175.37	96.01
BR/BT	FS	0.30	0.43	0.31	0.44	0.22	0.44
	C	0.48	0.46	0.56	0.49	0.56	0.39
AF (cm^2)	FS	1869.20	1276.20	1724.70	1144.00	1837.60	1131.80
	C	1921.60	2103.30	1454.60	1389.00	1574.30	960.40
RG (g)		46.51	55.60	33.24	27.47	35.49	27.84
IC		0.21	0.22	0.19	0.18	0.21	0.29
AP (cm)		104.05	108.70	93.61	98.67	100.78	94.06
LP (cm)		22.25	24.85	22.72	24.78	25.28	22.33
DF (días)		76.5	73.6	73.1	72.3	68.8	67.9

[1] BT= Biomasa total; BA= Biomasa aérea; BR= Biomasa radical; BR/BT= Relación BR/BT; AF= Área foliar; RG= Rendimiento de grano; IC= Índice de cosecha; AP= Altura de planta; LP= Longitud de panoja; DF= Días a floración; FS= Final de la sequía; C= Cosecha.

Cuadro 6. Características fisiológicas al final de la sequía para cada uno de los grupos de sorgo para grano bajo la condición de riego (R) y sequía (S).

Característica	Tratamiento de humedad	Grupo		
		Resistentes	Intermedios	Susceptibles
Potencial hídrico (MPa)	R	-1.43	-1.50	-1.47
	S	-2.00	-1.98	-1.96
Potencial osmótico (MPa)	R	-1.82	-1.91	-1.96
	S	-2.23	-1.94	-2.28
Potencial de presión (MPa)	R	0.40	0.42	0.49
	S	0.23	- 0.05	0.32
Cond. Estom. ($mmol.m^{-2}.s^{-1}$)	R	265.90	319.00	347.70
	S	52.30	184.90	56.30
Transpiración ($\mu g.cm^{-2}.s^{-1}$)	R	19.60	22.30	24.80
	S	6.41	10.75	8.08
Temperatura de la hoja (°C)	R	36.41	36.01	35.86
	S	41.12	40.36	40.82
CRA (%)	R	79.91	83.24	83.20
	S	71.48	74.54	72.39
C. de Ceras Epic. ($mg.cm^{-2}$)	R	0.05	0.06	0.05
	S	0.06	0.06	0.06

Cuadro 7. Respuesta en diferentes características y el rendimiento de grano de los genotipos de sorgo resistentes y susceptibles al estrés hídrico bajo riego (R) y sequía (S).

Genotipos	TH[1]	RG ($g.pta^{-1}$)	IC	AF (cm^2)	AP (cm)	DF (días)	NHL
Resistentes							
UAT 124	R	63.8	0.33	1574.6	113.0	76	20
	S	63.1	0.27	1903.5	100.0	70	20
UAT 152	R	50.8	0.25	2466.5	94.5	72	20
	S	72.0	0.28	1787.8	103.5	74	20
Susceptible							
UAT 30	R	66.7	0.35	2027.8	104.0	74	20
	S	34.0	0.32	1180.3	97.5	73	19

[1] TH= Tratamiento de humedad; RG= Rendimiento de grano; IC= Índice de cosecha; AF= Área foliar; AP= Altura de planta; DF= Días a floración; NHL= Número de hojas liguladas.

ron los más altos promedios de RG bajo la condición de sequía, mientras que en el susceptibles sucedió lo contrario. Además, el genotipo UAT 124 mantuvo un RG similar en las dos condiciones, mientras que el UAT en 152 el RG se incrementó en la condición de sequía en 42 %, lo cual se atribuye a su alta capacidad de recuperación después del estrés.

El alto RG de UAT 124 pudo deberse a que bajo la condición de sequía tuvo mayor AF y ésta se mantuvo activa por un período mayor en relación con la condición de riego, lo cual le permitió mayor fuente de asimilados durante el estrés hídrico y hasta la cosecha. Este comportamiento fue encontrado por Lilley y Fukai (1994) y podría utilizarse como un criterio de selección en programas de mejoramiento de la resistencia a la sequía, como señalan De Datta *et al.* (1988). El IC se incrementó únicamente en el caso de UAT 152 en 12 % bajo la condición de sequía con respecto a riego.

En cuanto al genotipo susceptible UAT 30, el RG fue reducido por efecto del estrés hídrico en 51 %, así como también se redujeron el AF y la AP.

Lo anterior indica que la clasificación de genotipos en función de su capacidad de acumular biomasa (BT y BR) junto con el RG como respuesta a un estrés hídrico puede ser un criterio de utilidad en el mejoramiento para la resistencia a la sequía en sorgo, debido a que la acumulación de biomasa es una respuesta fisiológica de la planta a las condiciones del medio, presentando además una alta heredabilidad como señalan Sankarapandian *et al.* (1993). Además, las diferencias en la capacidad de recuperación al estrés hídrico entre genotipos, también se hicieron patentes, estableciendo diferencias genotípicas, lo cual también debe ser considerado como un criterio importante en la identificación de genotipos resistentes a la sequía.

El comportamiento observado entre los genotipos, reafirma las diferencias genotípicas que existen en sorgo como respuesta al estrés hídrico, específicamente en la capacidad de acumular biomasa.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación se concluye lo siguiente:

El estrés hídrico causó un retraso en el crecimiento de la parte aérea (19 %) y un estímulo en el crecimiento de la raíz (65 %); sin embargo, no hubo diferencias entre condiciones en la biomasa total debido a un efecto de compensación entre sus componentes durante la sequía.

A la cosecha, la biomasa total fue reducida en 17 % por efecto del estrés hídrico, mientras que para la biomasa aérea los promedios entre condiciones fueron similares. En cambio, la acumulación de biomasa en la raíz después del riego de recuperación ocurrió a una tasa menor que la del período de sequía, por lo que se observó una reducción del 32 %.

La mayor capacidad de los genotipos de acumular biomasa durante el período de recuperación, después de la sequía, se reflejó directamente en el rendimiento de grano.

Los genotipos clasificados como resistentes produjeron un mayor rendimiento de grano bajo sequía dado por una mayor longitud de panoja, un mayor número de días a floración y una mayor área foliar activa mantenida hasta la cosecha.

De los caracteres fisiológicos, sólo la transpiración y la temperatura de la hoja tu-

vieron un comportamiento diferente entre los grupos resistente y susceptible por lo que la resistencia a la sequía estuvo determinada por la capacidad de producir biomasa durante el estrés hídrico y en el período de recuperación, más que por cambios en el estado de hidratación de la planta; así como por la habilidad de mantener un nivel apropiado del rendimiento de grano y un alto índice de cosecha bajo condiciones de estrés.

De acuerdo con los criterios de selección establecidos, 10 genotipos fueron clasificados como resistentes, nueve como intermedios y 10 como susceptibles, de éstos, dos genotipos resistentes UAT 124 y UAT 152 y uno susceptible UAT 30 fueron seleccionados para más estudios.

La clasificación de genotipos en función de su capacidad de acumular biomasa junto con el rendimiento de grano como respuesta al estrés hídrico puede considerarse como un criterio de utilidad en el mejoramiento para resistencia a la sequía en sorgo.

BIBLIOGRAFÍA

Blum, A. and G. F. Arkin. 1984. Sorghum root growth and water-use as affected by water supply and growth duration. Field Crop Res. 9:131-142.

_____. **1988**. Productivity and drought resistance of genetically improved cultivars as compared with native landraces of sorghum. Sorghum-Newsletter 31:41.

_____. **J. Mayer, and G. Golan. 1989**. Agronomic and physiological assessments of genotypic variation for drought resistance in sorghum. Aust. J. Agric. Res. 40:49-61.

Bolaños J. and G. O. Edmeades. 1993. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. I. Responses in grain yield, biomass and radiation utilization. Field Crops Res. 31:233-252.

_____ **,and L. Martínez. 1993**. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. III. Responses in drought-adaptive physiological and morphological traits. Field Crops Res. 31:269-286.

Boonjung, H. and S. Fukai. 1996. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions. 2. Phenology, biomass production and yield. Field Crops Res. 48: 47-55.

Castro N., S. y A. J. Huerta. 1994. Contenido de ceras epicuticulares en genotipos de sorgo como respuesta al estrés hídrico. Rev. Fitotec. Mex. 17:67-75.

Craufurd, P. Q. and J. M. Peacock. 1993. Effect of heat and drought stress on sorghum (*Sorghum bicolor*). II. Grain yield. Exp. Agric. 29 (1):77-86.

De Datta, S. K., J. A. Malabuyoc, and E. L. Aragón. 1988. A field screening technique for evaluating rice germplasm for drought tolerance during the vegetative stage. Field Crop Res. 19:123-134.

Ebercon, A., A. Blum, and W. R. Jordan. 1977. A rapid colorimetric method for epicuticular wax content of sorghum leaves. Crop Sci. 17:179-180.

Fukai, S. and M. Cooper. 1995. Development of drought-resistant cultivars using physiological traits in rice. Field Crops Res. 40:67-86.

Fussell, L. K., F. R. Bidinger, and P. Bieler. 1991. Crop physiology and breeding for drought tolerance: Research and development. Field Crop Res. 27 (3):183-199.

Gardner, F. P., R. B. Pearce, and R. L. Mitchell. 1985. Physiology of crop plants. Iowa State University Press. Ames Iowa. pp. 246-270.

Jamieson, P. D., R. J. Martin, G. S. Francis, and D. R. Wilson. 1995. Drought effects on biomass production and radiation-use efficiency in barley. Field Crop Res. 43: 77-86.

Lilley, J. M., and S. Fukai. 1994. Effect of timing and severity of water deficit on four diverse rice cultivars. III.- Phenological development,

crop growth and grain yield. Field Crop Res. 37:225-234.

Ludlow, M. M. and R. C. Muchow. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. Adv. Agron. 43:107-120.

_____ **J. M. Santamaría, and S. Fukai. 1990.** Contribution of osmotic adjustment to grain yield in Sorghum bicolor (L.) Moench under water-limited conditions. II. Water stress after anthesis. Aust. J. Agric. Res. 41:67-78.

Morgan, J. M. 1991. A gene controlling differences in osmorregulation in wheat. Aust. J. Plant Physiol. 18:249-257.

Parsons, L. R. 1982. Plant responses to water stress. *In*: M. N. Christiansen and C. F. Lewis (Eds.). Breeding plants for less favorable environments. Wiley Interscience Publication. pp. 175-192

Pospisilova, J. 1992. Plant responses to water stress. Biol. Plantarum 34:497-511.

Sankarapandian, R., D. Krishnadoss, N. Muppidathi, and S. Chidambaram. 1993. Variability studies in grain sorghum for certain physiological characters under water stress conditions. Crop Improvement 20(1):45-50.

Sharp, R. E., T. C. Hsiao, and W. K. Silk. 1990. Growth of the maize primary root at low water potentials. II. Role of growth and deposition of hexose and potassium in osmotic adjustment. Plant Physiol. 93:1337-1348.

Sharp, R. E. 1994. Physiology of root elongation at low water potentials advantage of a kinematic approach. Plant Physiol. (Supplement) 105:7.

Sinclair, T. R., J. M. Bennett, and R. C. Muchow. 1990. Relative sensitivity of grain yield and biomass accumulation to drought in field-grown maize. Crop Sci. 30:690-693.

Turner, N. C., and M. M. Jones. 1980. Turgor maintenance by osmotic adjustment. A review and evaluation. *In*: Adaptation of plants to water and high temperature stress. N. C. Turner and P. J. Kramer (eds.). Wiley-Interscience N. Y. pp. 87-103.

_____. **1997.** Further progress in crop water relations. Adv. Agron. 58: 293-338.