

Paulo César Magalhães<sup>1</sup>, Frederico O M. Durães<sup>1</sup>, Carlos Alberto Vasconcelos<sup>1</sup>, Gilson, V. E. Pitta<sup>1</sup> & Vera Maria C. Alves<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Embrapa Maiz y Sorgo - Núcleo de Estrés Abiótico y Relación Suelo-Agua Planta - NEA - Sete Lagoas, MG - Brasil

Traducido Por, Ing. Joaquín García P  
Investigador de CORPOICA Regional Dos

## I - Sequía

### A) Introducción

La disponibilidad del agua es el factor ambiental de mayor efecto bajore la productividad del cultivo del maiz. Considerando el balance hídrico de esta gramínea se puede decir que la absorción, el transporte y la consecuente transpiración del agua por las plantas son consecuencia de la demanda evaporativa de la atmósfera (evapotranspiración potencial), resistencia estomática y difusión de vapor, agua disponible en el suelo y densidad de raíces (Magalhães et al. 1995).

La planta absorbe agua del suelo para atender sus necesidades fisiológicas y, con esto, suplir su necesidad en nutrientes, que son transportados juntamente con ese flujo de masa. Del total de agua absorbida por la planta, una cantidad bien reducida (cerca del 1%) es retenida por la misma. Entretanto se puede pensar que haya desperdicio, en la verdad esto no ocurre, pues es por el proceso de transpiración (pérdida de calor latente) que los vegetales controlan su temperatura (Magalhães et al. 1995).

Las restricciones causadas por la baja disponibilidad de agua del suelo o por la alta demanda evaporativa accionan ciertos mecanismos fisiológicos que permiten a los vegetales escapar o tolerar esas limitaciones climáticas, modificando su crecimiento y desarrollo, y hasta mismo atenuando las reducciones en la producción final (Pimentel & Rossiello 1995).

Dentro de los mecanismos que pueden contribuir para la resistencia a la sequía, y que han sido considerados en programas de mejoramiento genético, se anotan: a) sistema radicular extenso o mayor relación raíz/parte aérea; b) pequeño tamaño de células; c) cutícula foliar (espesura, serosidad); d) cambios en el ángulo foliar; e) comportamiento y frecuencia estomática; f) acumulo de metabolito intermediario; g) ajuste osmótico; h) resistencia a la deshidratación de las células (Magalhães & Silva. 1987).

El maiz es cultivado en regiones en el cual la precipitación varia de 300 a 5.000 mm, siendo que la cantidad de agua consumida por una planta de maiz durante su ciclo está alrededor de 600 mm. Dos días de estrés hídrico en la fase de floración disminuye el rendimiento en mas de un 20%, cuatro a ocho días disminuyen en mas de un 50%. El efecto de la falta de agua, asociado a la producción de granos, es particularmente importante en tres etapas de desarrollo de la planta: a) iniciación floral y desarrollo de la inflorescencia, cuando es determinado el numero potencial de granos; b) período de fertilización, cuando es fijado el potencial de producción; en esta fase, la presencia del agua también es importante para evitar la deshidratación del grano de polen y garantizar el desarrollo y la penetración del tubo polínico; c) llenado de granos, cuando ocurre aumentos en la deposición de materia seca, el cual está intimamente relacionado a la fotosíntesis, ya que el estrés va resultar en una menor producción de carbohidratos, lo que implicaría menor volumen de materia seca en los granos. Por lo tanto, la importancia del agua está relacionada también con la fotosíntesis, una vez que el efecto del déficit hídrico bajore el crecimiento de las plantas implica menor disponibilidad de CO<sub>2</sub> para la fotosíntesis y una limitación en los procesos de elongación celular (Magalhães et al. 1995).

La falta de agua es siempre acompañada por interferencia en los procesos de síntesis de RNA y proteína, caracterizada por un aumento aparente en la cantidad de aminoácidos libres como la prolina. El mantenimiento de la presión de turgescencia celular a través de la acumulación de solutos (ajustamiento osmótico) es un mecanismo de adaptación de las plantas para su crecimiento o bajorevivencia en periodos de estrés de agua. A pesar del alto requerimiento de agua por la planta de maiz, ella es eficiente en su uso para conversión de materia seca.

### B) Problema y su Importancia

Sequía es la mayor fuente de inestabilidad del rendimiento de granos en el cultivo de maiz (*Zea mays* L.) creciendo en regiones tropicales, y el uso de genotipos con mayor tolerancia a la sequía ciertamente será una opción útil para los agricultores.

Existe una estimativa de que el 80% del maiz sembrado en regiones tropicales tienen su rendimiento promedio reducido de un 10 a un 50% debido al estrés hídrico (Edmeades et al., 1989). Esas pérdidas pueden aumentar, en el futuro, si, como es esperado, una mayor proporción del cultivo fuera realizado en áreas marginales, sujetas a sequía.

### C) Revisión de Literatura

El mejoramiento en el comportamiento de genotipos para trópicos áridos y semi-áridos, o condiciones típicas de estrés hídricos severos, por selección solamente por el rendimiento de granos es difícil, por causa de la variabilidad en cantidad y distribución temporal de la disponibilidad de humedad en el suelo de año a año. Características de planta que influyen en el rendimiento de granos tienen diferentes oportunidades para expresarse en diferentes años. Mejoradores (Blum, 1983; Rosenow et al., 1983) y fisiólogos de plantas (Bidinger et al., 1982; Garrity et al., 1982) creen que genotipos mejor adaptados y con mas alto rendimiento podrían ser mas eficientes y efectivos si atributos que confieren rendimiento bajo condiciones limitantes de agua pudiesen ser identificados y usados como criterio de selección. Entretanto, pocos son los ejemplos donde ese procedimiento haya sido utilizado, y aun menor donde se haya obtenido éxito (Passioura, 1981; Richards, 1982). Esto es particularmente debido a la dificultad de entender lo que causa bajos rendimientos de granos y como características putativas aumentan resistencia a la sequía y contribuyen para el rendimiento de granos en ambientes limitantes en agua. Por ejemplo, porque el rendimiento es una integral del crecimiento en toda el periodo, una característica que influencia la capacidad de la planta en crecer durante o bajorevivir en período de estrés hídrico puede ser relativamente sin importancia en el contexto del ciclo de vida del cultivo.

También, frecuentemente, características son escogidas y evaluadas con base en teoría, experimentación de laboratorio, o correlaciones (probablemente mas casual de que causal) entre la presencia de la característica y rendimiento en ambientes propensos a la sequía, sin condiciones suficientes para demostrar si o como la característica particular contribuye para el rendimiento final. La acumulación de prolina es un buen ejemplo de tales características, que no ha tenido valor como un criterio de selección. Alta acumulación de prolina fue apuntada como una característica de resistencia a la sequía en cebada por causa de sus correlaciones con el rendimiento de granos en ambientes limitantes en agua (Hanson et al., 1979). Entretanto, investigaciones subsecuentes mostraran que mas prolina ocurrió en hojas muertas (Stewart & Hanson, 1980) y esto no contribuyo para la bajorevivencia, ni para el rendimiento de granos.

Adicionalmente, poca atención ha sido dada en establecer si hay variabilidad genética para características particulares entre genotipos de cultivos, y aun son menores los estudios de su herencia. Todos esos pasos son necesarios para asegurar que un aumento en el rendimiento ocurrirá en un ambiente específico cuando una característica es introducida en diferentes genotipos bien-adaptados con buen potencial de rendimiento. Entretanto, con pocas excepciones, esto raramente ha sido realizado. Consecuentemente, no es sorpresa que la tasa de éxito haya sido baja.

Algunas características han sido propuestas para el mejoramiento del rendimiento de granos de cultivos afectados por la sequía (Seetharama et al., 1983; Clarke & Townley-Smith, 1984; Turner, 1986a,b). Características fisiológicas y morfológicas con presumible valor adaptativo bajo condiciones de sequía fueron incluidas con rendimiento de granos en un índice de selección en la expectativa de que esto podría mejorar el status hídrico y la eficiencia del uso del agua (WUE) de cultivos. En evaluaciones precoces del progreso, el uso del índice de selección no resulto en mayores ganancias en el rendimiento de granos bajo sequía en comparación con la selección para rendimiento de granos "per se" (Edmeades et al., 1987; Fischer et al. 1989). Según esos autores, la selección de 30-40% de familias fue basada en un índice que busco mantener constantes el tiempo de maduración y rendimiento de granos bajo condiciones bien irrigadas; incrementar el rendimiento de granos y la tasa de crecimiento del tallo y hojas bajo sequía; y reducir el intervalo antesis-emisión de estilo/estigma - IFMF (ASI, "anthesis-silking interval"), la tasa de senescencia foliar y temperaturas del dosel bajo estrés hídrico.

Algunas características secundarias, tales como las tasas de expansión y senescencia foliar, la tasa de extrusión del estilo/estigma y temperatura del dosel, han sido demostradas dependientes directamente del status del agua en la planta (Westgate & Boyer, 1986; Blum, 1988; Ludlow & Muchow, 1990).

Buscando estudiar las respuestas directas y correlacionadas para selección en rendimiento de granos y sus componentes, fitomasa total, y uso eficiente de radiación, Bolaños & Edmeades (1993a) evaluaran los ciclos 0, 2, 4, 6 e 8 del Tuxpeño Sequía y el ciclo 6 de un genotipo testigo, en tres régimen de humedad. Los resultados sugieren que el estrés hídrico, cuando administrado para coincidir con floración, puede tener una efectiva selección ambiental para aumentar el índice de cosecha, estabilidad del rendimiento y rendimiento de granos de maiz tropical para ambientes con amplio rango de humedad.

En maiz, cuando el estrés hídrico por sequía ocurre inmediatamente antes y durante el período de floración, un retardo en la floración femenina es observado resultando en un aumento en la longitud del intervalo entre floración masculina y femenina - IFMF, en días (Hall et al., 1982; Westgate & Bassetti, 1990; Bolaños & Edmeades, 1993b). Esta falta de sincronismo entre floración masculina (FM) y femenina (FF) ha sido asociada con una disminución en el rendimiento de granos bajo sequía (DuPlessis & Dijkhuis, 1967; Hall et al., 1981; Westgate & Boyer, 1986; Bolaños & Edmeades, 1993b). Selección para reducido IFMF bajo estrés hídrico controlado, impuesto en la floración, promueve un efectivo y rápido procedimiento para un mas alto y mas estable

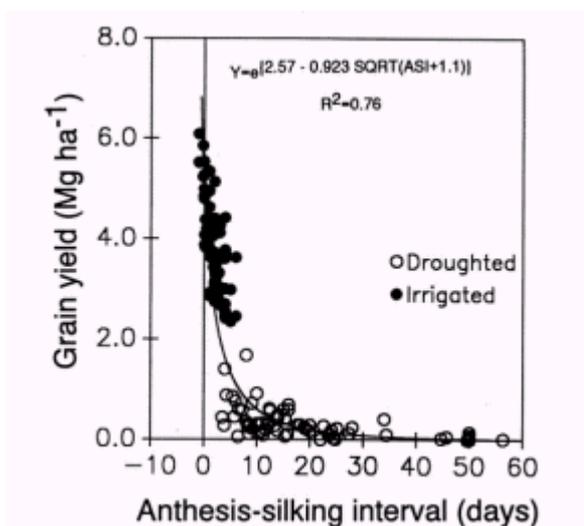
rendimiento de granos en maíz tropical (Edmeades et al., 1989; Bolaños & Edmeades, 1996; Durães et al., 1997, Durães et al. 2000, Durães et al. 2001). Bajo IFMF indica sincronismo en la floración que traduce una adaptación a dado estrés y está asociado al rendimiento de granos, bajo condiciones adversas. Reducido IFMF es parcialmente consecuencia de un mayor potencial hídrico de la planta durante la floración. Estrés hídrico provoca retraso en la emergencia de la inflorescencia femenina (estilo-estigma) en relación a la liberación del grano de polen, habiendo reducción en el número de granos fertilizados y consecuentemente en la productividad.

Resultados experimentales han mostrado ser ineficiente a la selección para rendimiento de granos, bajo estrés hídrico severo, porque la estimativa de la heredabilidad del rendimiento de granos en esas condiciones ha sido baja. Entretanto, bajo esas condiciones, características secundarias pueden incrementar la eficiencia de selección, desde que ellas tengan valor adaptativo, alta heredabilidad, sean fáciles de medir y de sean correlacionadas con la característica principal. Aumentos relativos en las tasas de elongación del tallo y hojas, retraso en la senescencia foliar, reducción en la temperatura del dosel y reducido ASI fueron usados por Bolaños & Edmeades (1993c) para aumentar la eficiencia de selección para rendimiento de granos bajo sequía durante ocho ciclos de selección en población de maíz tropical, Tuxpeño Sequía. Ese estudio indico que el aumento en la tolerancia a la sequía en Tuxpeño Sequía fue debido al aumento de partición de fitomasa a través del desarrollo de la espiga durante un severo estrés de sequía que coincidió con la floración mas propiamente que un cambio en el status hídrico en la planta.

#### D) Resultados de investigación:

Trabajo realizado en México con ciclos de selección para la tolerancia a la sequía conducido por Bolaños & Edmeades (1993b), donde ellos utilizaron varios genotipos y dos régimen hídricos (irrigado y estresado), revelo que cuando los datos experimentales fueron colocados en una gráfica, siendo los genotipos y los régimen hídricos colocados en el mismo eje, el rendimiento de granos mostró una fuerte dependencia estadística para el intervalo entre floración masculina y femenina (ASI), (Figura 1).

En la Figura 2 (a, b y c) se puede observar respectivamente la relación entre ASI y el número de granos por planta, mazorcas por planta e índice de cosecha. Todos estos parámetros mostraron una fuerte dependencia para ASI, o sea a medida que el intervalo de floración masculina y femenina aumenta, las características en cuestión disminuyeron sus valores. Es verdad que el número de mazorcas por planta y el índice de cosecha mostraron datos menos concentrados, por lo tanto la dependencia estadística fue un poco menor que para el número de granos y rendimiento.

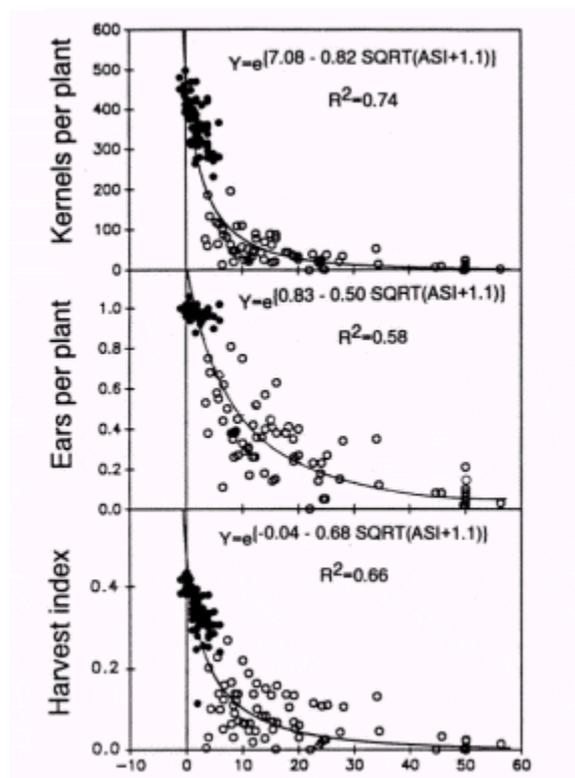


Fonte: Bolaños & Edmeades (1993b)

**Figura 1 - Relación entre el intervalo de floración masculina y femenina y rendimiento de granos para datos combinados de seis genotipos de maíz cultivados en dos régimen hídricos: bien irrigado y con estrés. Tlaltizapan, México.**

Fue encontrado en este mismo trabajo correlaciones significativas entre la biomasa de la mazorca en la floración y ASI o número de mazorcas por planta (Figuras 3a y 3b respectivamente). Se observa también que la biomasa de la mazorca aumento a medida que la disponibilidad de humedad en el suelo también aumentaba. Por otro lado a pesar de grande variación en la biomasa de la mazorca en régimen irrigado, el número de mazorcas por planta permaneció próximo a 1.00. En el régimen seco, hubo una variación considerable en los datos, pero en general el

inicio del apareamiento de mazorcas estériles fue asociado con el promedio de biomasa de mazorca menor que 1 g por planta (Figura 3b).



Fuente: Bolaños & Edmeades (1993b).

Figura 2 - Relación entre el intervalo de floración masculina y femenina (ASI) y el número de granos por planta (a), mazorcas por planta (b) e índice de cosecha (c) para datos combinados de seis genotipos de maíz cultivados en dos regímenes hídricos: bien irrigado y con estrés. Tlaltizapan, México.

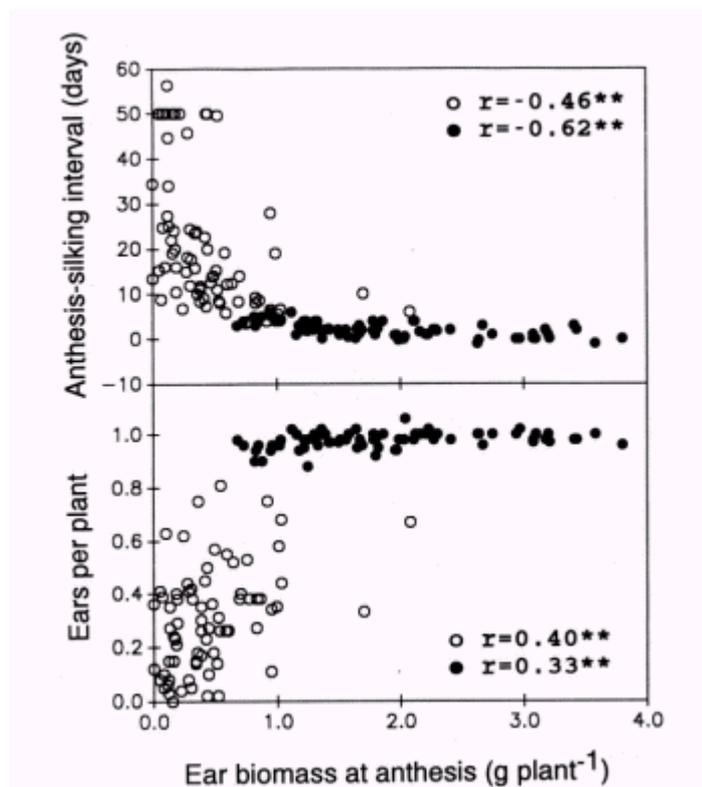


Figura 3 - Relación entre la biomasa de mazorca por planta, en la floración, y el intervalo de floración masculina e femenina (a), y el número de mazorcas por planta para datos combinados de seis cultivares de maíz cultivados en dos regímenes hídricos: bien irrigado y estresado. Tlaltizapan, México.

Fuente: Bolaños & Edmeades (1993b).

## Trabajos de Durães &amp; Magalhães y colaboradores (2000 e 2001)

Estos trabajos fueron realizados en Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil, y consistieron básicamente en una estrategia de mejoramiento de maíz buscando tolerancia a sequía. Para tal fin varias líneas con alto grado de endogamia, fueron estudiadas bajo varios régimen hídricos que variaban entre bien irrigados y estresados en las épocas de pré-floración y floración.

Las variables descriptoras de las líneas de maíz referente al primer trabajo, Durães et al. (2000), están contenidas en las tablas 1 y 2, en cuanto que la clasificación de las líneas en cuatro grupos, basadas en cuartil pueden ser apreciadas en la Tabla 3.

Tabla 1. Variables descriptoras<sup>1</sup> de líneas de maíz, durante la etapa reproductiva. Embrapa Maiz y Sorgo. Sete Lagoas, MG. 2000.

Líneas	Altura (cm)	Etapas de crecimiento (días)		
		FV = G a FF	FR = FF a PMF	Ciclo = G a PMF
L1 – L1170	134,3	72	42	114
L2 – L1147	126,6	80	37	117
L3 – L13.L1.2	90,8	73	43	116
L4 – L6.1.1	114,9	75	41	116
L5 – L10.1.1	118,8	78	39	117
L6 – L8.3.1	99,9	75	41	116
L7 – 1.2.1	132,1	79	38	117
L8 – L1.2.3	152,5	74	43	117
L9 – L8.1	135,6	72	45	117
L10 – L10.2	100,7	76	38	114
L11 – LC23767	164,7	83	37	120
L12 – L53	126,9	79	41	120

<sup>1</sup>Fuente: Durães et al. 2000

Tabla 2. Variables descriptoras<sup>1</sup> de líneas de maíz, durante la etapa reproductiva. Embrapa Maiz y Sorgo. Sete Lagoas, MG. 2000.

Líneas	IFMF (Días)	MS (g) Planta	MS (g) Grano	IC
L1 – L1170	2.0	129.4	35.1	0.29
L2 – L1147	4.8	85.0	19.4	0.25
L3 – L13.L1.2	-1.5	110.9	54.4	0.48
L4 – L6.1.1	-2.1	125.4	65.3	0.53
L5 – L10.1.1	-2.1	132.9	55.6	0.45
L6 – L8.3.1	-2.1	86.2	42.9	0.51
L7 – 1.2.1	0.0	126.7	62.2	0.49
L8 – L1.2.3	-1.0	136.1	70.0	0.51
L9 – L8.1	0.8	92.1	44.2	0.48
L10 – L10.2	0.8	55.7	63.3	0.56
L11 – LC23767	3.0	125.7	13.1	0.11
L12 – L53	2.8	94.4	50.3	0.53

<sup>1</sup>Fonte: Durães et al. 2000

La Línea 11 (L C 237-67) presento la mayor altura y la Línea 3 (L13.L1.2) la menor. El período de llenado de granos, en cuanto etapa crítica del desarrollo, permite distinguir estrés sufridos por la planta y pérdidas de rendimiento (Martiniello 1984; Bolaños & Edmeades 1993). En la Tabla 1 son presentados los períodos de llenado de granos (PEG) y del ciclo de vida de cada una de las líneas estudiadas. Se observa que ocurrió un período de oscilación de ocho días entre las líneas, siendo las L2 (L1147) y L11 (LC237-67) las mas precoces con 37 días y la L9 (L8.1) la mas tardía con 45 días, sin gran diferenciación en el ciclo total de vida con 117, 120 y 117 días, respectivamente.

El parámetro IFMF, considerado como indicador para seleccionar genotipos con tolerancia a la sequía se presto para discriminar las líneas estudiadas (Tabla 2). Las líneas L3, L4, L5, L6 y L8 presentaron protogenia (valores negativos de IFMF, entre -2,1 a -1,5). El rendimiento y los componentes, presentados en la Tabla 2, muestran que el índice de Cosecha (IC) oscila entre 11 e 56%, en las líneas L11 (LC237-67) y L10 (L10.2), respectivamente. Las líneas L3, L4, L12, L6, L8 y L10 presentaron IC superior al 50%. El IC tiene un valor fisiológico importante, por

representar el porcentaje de partición de materia seca del grano en relación a la planta total. La línea L11 (LC237-67) a pesar de presentar un IC inferior al 20%, tiene una característica promisoría para prolificidad (capacidad de producir dos espigas viables). Es importante observar, a través de los resultados de IC, que este indicador de rendimiento es modulado por factores ambientales, y que separadamente, no se presta como criterio de selección de genotipos (Monteiro et al. 1998). Se observa, por ejemplo, que las líneas L6 y L8, y L5 y L9, que IC superior no representa necesariamente una mayor producción de grano.

Todos los grupos de líneas (Tabla 3) tuvieron reducido, a valores próximo de cero, el contenido de clorofila, al llegar a la madurez fisiológica. Comportamiento similar se observo para la área foliar verde, en todas las líneas.

En los agrupamientos por líneas se observa una tendencia de que las líneas que presentan menor duración del período de llenado de granos son las que también presentan mayor rendimiento de grano (Tabla 3). Este hecho no ocurre en todos los genotipos, indicando que la velocidad de llenado y, por lo tanto, la inclinación de la curva de llenado es una variable influenciada por la interacción genotipo-ambiente.

Tabla 3 - Datos de agrupamiento, en el período de floración la madurez fisiológica de semillas de líneas de maíz contrastantes para el parámetro fenotípico IFMF. Embrapa Maiz y Sorgo. Sete Lagoas, MG. 2001.

Líneas	Agrupamientos/Variable
	Altura de Planta (cm)
L8	> 152
L2, L7, L1	126 a 136
L4, L5	114 a 119
L3, L6	90 a 101
	Altura de 1ª Espiga (cm)
L5	> 69
L1, L2, L8, L7	56 a 69
L4	42 a 55
L3, L6	35 a 41
	IFMF (Intervalo entre floración masculina y femenina, en días)
L8, L3, L6, L5, L4	-2,5 a -0,1
L7	0,0 a 0,9
-	1,0 a 1,9
L2, L1	2,0 a 5,0
	Area Foliar (cm <sup>2</sup> ), en la Floración
L8, L7, L5	> 4260
L1	3546 a 4260
L4, L3, L2	2201 a 3545
L6	2116 a 2200
	[Clorofila, µg.g <sup>-1</sup> MF Foliar], en la Floración
L4	> 3000
L5, L3	2701 a 3000
L8, L7, L2	2001 a 2700
L6, L1	1900 a 2000
	Período de Llenamiento de Granos (días)
L8, L3	> 43,0
L1	41 a 42
L6, L4	39 a 41
L2, L7, L5	37 a 39
	Rendimiento de grano (g) <sup>a</sup> , en la cosecha
L7, L4, L8	> 55,8
L6, L3, L5	41,6 a 55,8
L1	27,4 a 41,5
L2	13,1 a 27,3
	IC (Índice de Cosecha)
L6, L8, L4	> 0,50
L5, L3, L7	0,44 a 0,50
-	0,34 a 0,43
L2, L1	0,25 - 0,33
	Intensidad de Enfermedad <sup>b</sup> ( <i>Puccinia polysora</i> )
L1, L5	> 6,5
L3, L6, L4	5,1 a 6,5
L8, L2	3,0 a 5,0
L7	< 3,0

<sup>a</sup> Média de 03 plantas/Línea.

<sup>b</sup> Enfermedad causada por *P. polysora* (evaluada a través de escala visual - 1, ausencia a 9 - mas de 75%)

## II Suelos Ácidos

### A) Aspectos generales:

Los suelos ácidos están en toda la extensión del cerrado brasileiro, cuya área total es de 205 millones de ha. La producción agropecuaria brasileira ocupa una área con potencial para producción agrícola de 127 millones de ha. De este total 12 - 15 millones de ha se encuentran en producción, siendo 25% sembrado con arroz, maíz y soya, 20% con café y 15% con frijol. Del cerrado son también producidos 40% de carne, 12% de leche.

Entre los factores que limitan la producción de cultivos en suelos bajo vegetación de cerrado se pueden citar: acidez elevada, alta capacidad de fijación de P, baja fertilidad natural, niveles tóxicos de aluminio, distribución irregular de lluvias, baja capacidad de cambio de cationes. Una primera aproximación para vencer los factores limitantes a la producción de cultivos en este sistema sería: encañado en la capa superior del suelo, pero con la permanencia de sub-suelo ácido, adición de altas dosis de fertilizantes fosfatados, siembra más temprana para escapar del estrés hídrico, pero en términos prácticos ni siempre eso es posible o efectivo. El empleo de estas prácticas, sin embargo, han sido poco eficiente.

Una segunda alternativa para combatir el problema sería el desarrollo de métodos más adecuados de manejo del suelo y cultural, como por ejemplo: la fertilización fosfatada, manejo de la materia orgánica, siembra directa, rotación de cultivos, y por fin el uso de genotipos más adaptados a suelos ácidos.

### B) Síntomas de toxicidad de aluminio:

El primer síntoma de toxicidad es la inhibición de la elongación de la raíz la cual ocurre cerca de 1 - 2 horas después de la exposición al Al. El ápice radicular es el sitio primario de la acción del Al debido al mayor acumulo de este elemento, resultando en un mayor daño físico en esta región de que en los tejidos maduros de la raíz. Apenas 2 a 3 mm del ápice radicular necesitan ser expuestos al Al para que el crecimiento radicular sea inhibido. Los efectos más visibles del Al es el engrosamiento de las raíces y una coloración marrón característica. Actualmente hay dificultades en diferenciar los efectos primarios de los efectos secundarios del Al en las raíces.

Los síntomas secundarios de la toxicidad de Al son los siguientes: competición/interacción del Al e H con nutrientes, (ej: P, Ca, Mg, Fe), reducción de la elongación de las raíces, sistema radicular más superficial, baja densidad de raíces, menor volumen de suelo explorado y formación de raíces gruesas con baja superficie específica. La consecuencia por tanto será menor absorción de agua y nutrientes.

### C) Mecanismos de tolerancia al Al:

Pueden ser clasificados básicamente en dos tipos: mecanismos de exclusión (apoplasto): los cuales previenen para que el Al no atraviese la membrana plasmática y penetre en el simplasto y mecanismos de tolerancia interna (simplasto): que inmovilizan, compartimentalizan o desintoxican el Al que penetra en el simplasto.

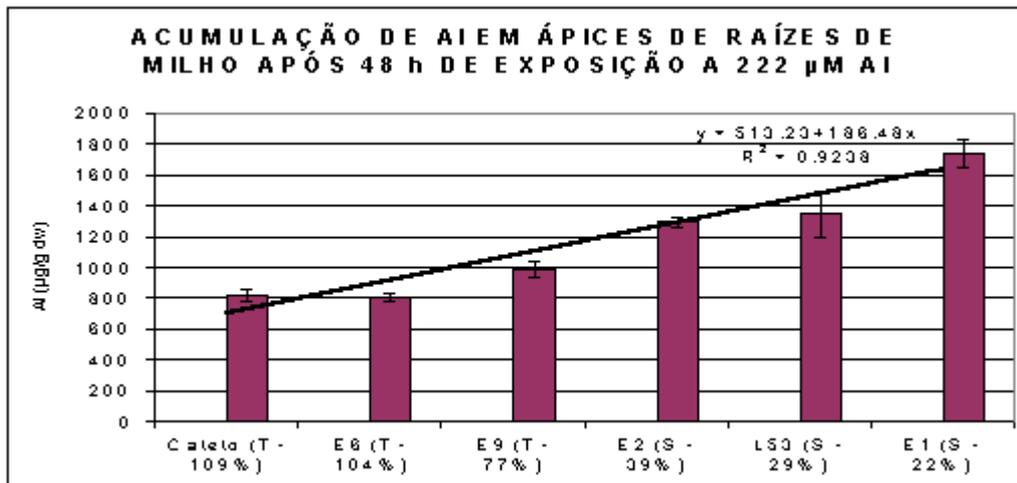
Los mecanismos de exclusión son aquellos en que el enlace del Al se da en la pared de las células, hay una modificación del pH de la rizosfera y exudación por las raíces de compuestos que forman quelatos con el Al (como por ejemplo los ácidos orgánicos), habiendo también una disminución de la CIC de raíces.

Ya con los mecanismos de tolerancia interna a la retención del Al se da en sitios no metabólicos de la raíz o parte aérea, siendo que la precipitación (inmovilización) del aluminio ocurre en el citoplasma (por ejemplo ácidos orgánicos).

### D) Resultados experimentales:

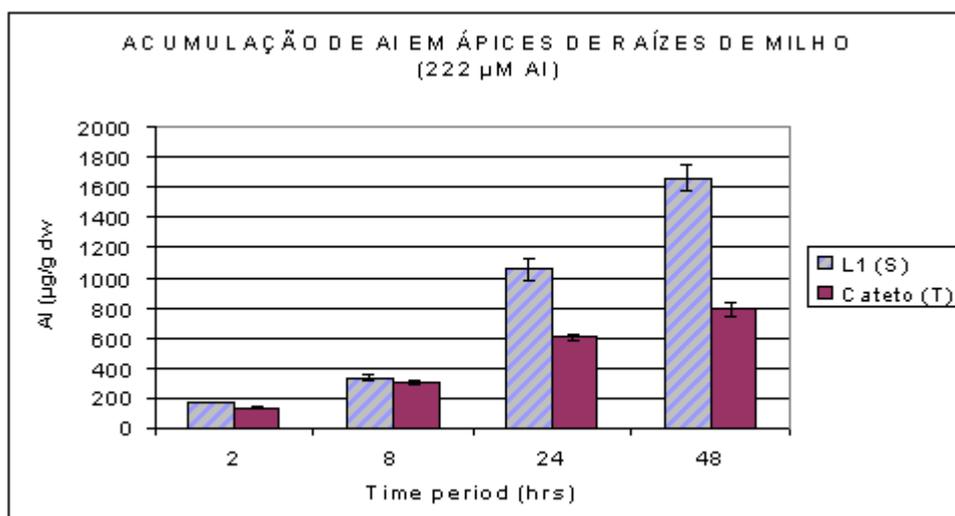
La Figura 1 muestra claramente variabilidad genética para aumentar Al en el ápice de la raíz.

**Figura 1 - Acumulación de Al en ápices de raíces de maíz después de 48 hs de exposición a 222 mM de Al. Sete Lagoas, MG. 2000.**



Fuente: Alves, et al. (2000)

Figura 2 - Acumulación de Al en ápices de raíces de maiz (222 mM de Al). Sete Lagoas , MG . 2000



Fuente: Alves et al. (2000).

En la Figura 2, se nota la acumulación del Al en dos genotipos de maiz, cateto, material tolerante y la línea L1, sensible al Al.

**D1) Exudación de ácidos orgánicos:**

La caracterización de un material patrón puede ser hecha de la siguiente manera:

A partir de 6 líneas con base genética diferenciada: siendo 4 tolerantes y 2 sensibles al Al, se colocan para germinar por 3 días, se hace el transplante para solución nutritiva completa (Magnacaca, pH 4,5). Después de 24 horas, la solución es cambiada y se adiciona {40mM} Al. Se hace entonces la medición del crecimiento de raíz seminal.

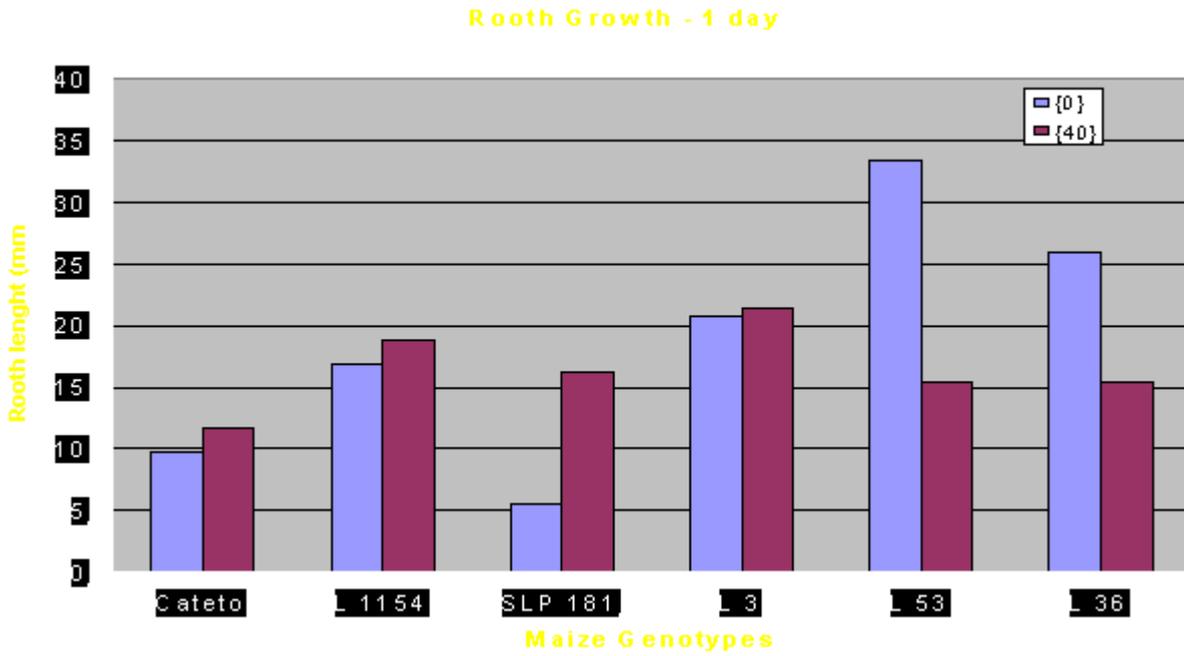


Figura 3 - Crecimiento de raíz seminal de 6 líneas de maíz en solución con 0 e 40 mM de Al. Sete Lagoas, MG. 2000.

Fuente: Alves et al. (2000)

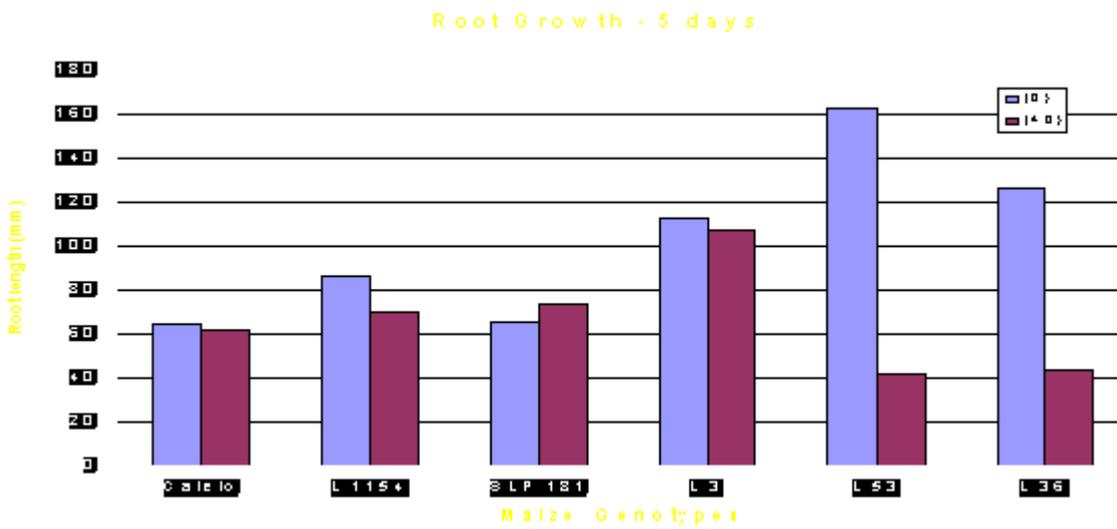


Figura 4 - Crecimiento de raíz seminal de 6 líneas de maíz en solución con 0 e 40 mM de Al. Sete Lagoas, MG. 2000.

Fuente: Alves et al. (2000)

La Figura 4, muestra el crecimiento de las raíces seminales con 05 días de exposición a las concentraciones de Al de 40mM y 0 respectivamente. Las líneas Cateto, L1154, SLP181 y L3 son consideradas tolerantes al Al, encuanto que L53 y L36 son consideradas sensibles.

## SELEÇÃO PARA TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO

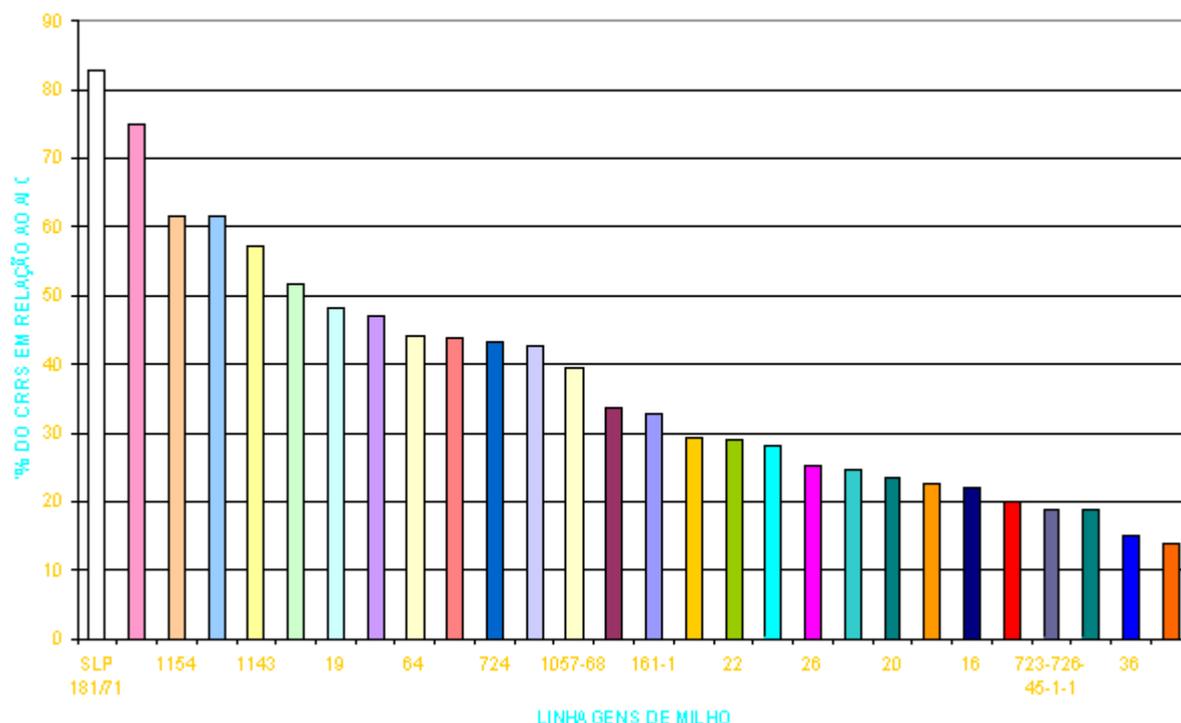


Figura 5 - Porcentagem de crescimento de la raíz seminal de diversas líneas de maiz. Sete Lagoas, MG - 2000. Fuente: Alves.et al. (2000)

La Figura 5 muestra la tremenda variabilidad genética e diversos genótipos de maiz, en solución nutritiva en presencia de Al.

### E) Algunos métodos de selección para tolerancia al aluminio

La técnica ideal de selección debe llenar los siguientes criterios:

- 1 - Alta correlación entre el genótipo seleccionado con su comportamiento en el campo en area bajo estrés
- 2 - Facilidad de manipular gran número de individuos
- 3 - Alto poder de discriminación
- 4 - Alta reproductividad
- 5 - No ser destructiva
- 6 - En casos donde haya necesidad de hacer cruzamientos, los resultados deben estar disponibles antes de la floración

Dentro de las ventajas y desventajas de una evaluación en suelos ácidos con alta saturación de Al, en condiciones de "campo", se pueden citar:

#### Ventajas:

- a) Evaluación del crecimiento de los genótipos en condiciones naturales de suelo y clima
- b) Obtención de datos de producción de granos y de la biomasa total que reflejen los efectos del estrés durante todo el ciclo de la planta.

#### Desventajas:

- a) Difícil separación de los diferentes estrés simultáneos que ocurren en el campo
- b) Dificultad de manipular gran número de individuos
- c) Necesidad de áreas mas homogéneas
- d) Deben ser realizados pruebas preliminares para establecer el nivel adecuado de saturación de Al para la selección de genótipos (en el caso del maiz se estima un valor de 40-50% de Al)
- e) Debe ser establecido un índice para la separación de los genotipos.

Con la evaluación en suelo de "casa de vegetación o invernaderos" los pros y contras serían los siguientes:

**Ventajas:**

- a) Evaluación de gran número de materiaies
- b) Obtención de resultados en corto espacio de tiempo
- c) Necesidad de pequeño volumen de suelo

**Desventajas**

- a) Difícil separación de los diferentes estrés simultáneos que ocurren en el suelo
- b) Apenas un horizonte de suelo es utilizado
- c) Secado y tamizado del suelo modifican características químicas y físicas del suelo
- d) Se evalúa únicamente la producción de materia seca de la parte aérea y no la producción de granos
- e) Deben ser realizadas pruebas preliminares para establecer el nivel adecuado de saturación de Al para la selección de genótipos, similar al encontrado en el campo
- f) Debe ser establecido un índice para la separación de los cultivares

En el caso que la evaluación sea en solución nutritiva se considera lo siguiente:

**Ventajas:**

- a) Permite evaluar gran número de genótipos
- b) Obtención de resultados en corto espacio de tiempo
- c) Permite control preciso del nivel de estrés
- d) Posibilidad de aislar apenas los estrés de toxicidad de Al y acidez

**Desventajas**

- a) Evalúa apenas la respuesta inicial al estrés
- b) No lleva en cuenta otros factores bióticos y abióticos del suelo
- c) Poco adecuado para especies que se propagan vegetativamente
- d) Deben ser realizadas pruebas preliminares para establecer el nivel adecuado de Al para la selección de genótipos (correlación de la concentración del Al en solución con la concentración en el suelo).
- e) Costo elevado
- e) Debe ser establecido un índice para la separación de los genotipos.

Las características que pueden ser utilizadas en la selección son: crecimiento radicular (crecimiento líquido, crecimiento relativo, crecimiento absoluto), producción de calose, exudación de ácidos orgánicos, entre otras.

**LITERATURA CITADA**

- BIDINGER, F.R.; MAHALAKSHMI, V.; TALUKDAR, B.S.; ALAGARSWAMY, G. 1982. In: Drought Resistance in Crops with Emphasis on Rice, pp. 357-375. Int. Rice Res. Inst., Los Banos, Philippines.
- BLUM, A. 1983. In: STONE, J.F. & WILLIS, W.O., eds. Plant Production and Management under Drought Conditions, pp. 195-205. Elsevier, Amsterdam.
- BLUM, A. 1988. Plant Breeding for Estrés Environments. CRC Press, Boca Raton, FL, 223 pp.
- BOLAÑOS, J.; EDMEADES, G.O. 1993a. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. I. Responses in grain yield, biomass, and radiation utilization. Field Crops Research, Amsterdam, v.31, p.233-252,.
- BOLAÑOS, J.; EDMEADES, G.O. 1993b. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. II. Responses in reproductive behavior. Field Crops Research, Amsterdam, v.31, p.253-268,.
- BOLAÑOS, J. & EDMEADES, G.O. 1993c. 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.
- BOLAÑOS, J.; EDMEADES, G.O. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. Field Crops Research, Amsterdam, v. 48, p.65-80, 1996.
- DuPLESSIS, D.P.; DIJKHUIS, F.J. The influence of the time lag between pollen-shedding and silking on the yield of maize. South African Journal Agricultural Science, Pretoria, v.10, p.667-674, 1967.
- DURÃES, F.O.M.; PAIVA, E.; MAGALHÃES, P.C.; SANTOS, M.X.; PEREIRA, J.J.; LABORY, C.R.G. Critérios morfo-fisiológicos utilizados para seleção de genótipos de milho visando tolerância à seca. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FISILOGIA VEGETAL, 6., 1997, Belém,, PA. Resumos. Belém: SBFV, 1997. p.291
- DURÃES, F.O.M.; MAGALHÃES, P.C.; FERRER, J.L.R.; MACHADO, R.A.F. Adaptação de milho às condições de seca: 2. Florescimento e Maturidade Fisiológica de Sementes de Linhagens Contrastantes para o Parâmetro Fenotípico IFMF. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 23., 2000, Uberlândia, MG. Resumos. Uberlândia, MG. ABMS; Embrapa, 2000. p. 141.
- DURÃES, F.O.M.; MAGALHÃES, P.C., SANTOS, M. X. dos, OLIVEIRA, A.C.; Adaptação de milho às condições de seca: Identificação e caracterização de genótipos, estudos e mecanismos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FISILOGIA VEGETAL, 8. Ilhéus, 2001. Resumos. Ilhéus, BA. SBFV; CEPLAC/CEPEC; UESC. Setembro, 2001. p 113.
- EDMEADES, G.O.; BOLAÑOS, J.; LAFITTE, H.R.; RAJARAM, S.; PFEIFFER, W.; FISCHER, R.A. 1989. Tradicional approaches to breeding for drought resistance in cereals. In: BAKER, F.W.G., ed. Drought Resistance in Cereals.

- ICSU and CABI, Paris and Wallingford, pp. 27-52.
- EDMEADES, G.O.; FISCHER, K.S. & ISLAM, T.M.T. 1987. Improvement of maize yield under drought estr ss. In: MENYONGA, J.M.; BEZUNCH, T.; YOUDEOWI, A., eds. Food Grain Production in Semi-Arid Africa. OUA/STRC-SAFGRAD, Ouagadougou, Burkina Faso, pp. 191-210.
- FISCHER, K.S.; EDMEADES, G.O. & JOHNSON, E.C. 1989. Selection for the improvement of maize yield under moisture-deficits. *Field Crops Res.*; 22:227-243.
- GRANT, R.F.; JACKSON, B.S.; KINIRY, J.R.; ARKIN, G.F. Water Deficit Timing Effects on Yield Components in Maize. *Agronomy Journal*, v.81, p.61-65, 1989.
- GARRITY, D.P.; SULLIVAN, C.Y.; ROSS, W.M. 1982. In: Drought Resistance in Crops with Emphasis on Rice, pp. 339-356. In: *Rice Res. Inst.*, Los Banos, Philipines.
- HALL, A.J.; LEMCOFF, J.H.; TRAPANI, N. Water estr ss before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica* 26:19-38. 1981.
- HALL, A.J.; VILELLA, F.; TRAPANI, N.; CHIMENT, C. The effects of water estr ss and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.5, p.349-363, 1982.
- HANSON, A.D.; NELSEN, C.E.; PEDERSEN, A.R.; EVERSON, E.H. Capacity for proline Acumulaton During Water Estr ss in Barley and its Implications for Breeding for Drought Resistance. *Crop Sci.* 19 (4):489-493. 1979.
- LUDLOW, M.M. & MUCHOW, R.C. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yield in water-limited environments. *Adv. Agron.*, 43:107-153.
- MARTINELLO, P. Drought resistance in maize: Methods of detection and breeding considerations. *Genetica Agraria*, Roma, v.38, n.3, p.267-302, 1984.
- MAGALH ES, P.C.; DUR ES, F.O.M.; PAIVA, E. Fisiologia da planta de milho. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 1995. 27 p. (EMBRAPA-CNPMS. Circular T cnica, 20).
- MAGALH ES, A. C. Fotoss ntese, particionamento de assimilados e crescimento de plantas bajo condi es de eestr sse: com destaque para o milho. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL BAJORE EESTR SSE AMBIENTAL, 1., 1992, Belo Horizonte, MG. O milho em perspectiva - anais. Sete Lagoas: EMBRAPA - CNPMS / M xico: CIMMYT / UNDP, 1995. p. 195-221. Editado A T. Machado, R. Magnavaca, S. Pandey, A.F. as Silva.
- MONTEIRO, M.A.R.; DUR ES, F.O.M.; CRUZ, J.C.; Oliveira, A.C.  ndice de colheita: um forte conceito fisiol gico de uso inadequado para sele o de cultivares de milho. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 22., 1998, Recife, PE. Resumos. Recife: IPA, 1998. p.261
- PIMENTEL, C. ROSSIELO, R. O P. Entendimento bajore rela es h dricas na cultura do milho. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL BAJORE EESTR SSE AMBIENTAL, 1., 1992, Belo Horizonte, MG. O milho em perspectiva - anais. Sete Lagoas: EMBRAPA - CNPMS / M xico: CIMMYT / UNDP, 1995. p. 131-146. Editado A T. Machado, R. Magnavaca, S. Pandey, A.F. as Silva.
- PASSIOURA, J.B. 1981. In: EVANS, L.T. & PEACOCK, W.J., eds. *Wheat Science: Today and Tomorrow*, pp. 191-201. Cambridge Univ. Press London.
- RICHARDS, R.A 1982. In: Drought Resistance in Crops with Emphasis on Rice, pp. 303-316. *Int. rice Res. Inst.*, Los Banos, Philipines.
- ROSENOW, D.T.; QUISENBERRY, J.E.; WENDT, C.W.; CLARK, L.E. 1983. In: STONE, J.F. & WILLIS, W.O., eds. *Production and Management under Drought Conditions*, pp. 207-222. Elsevier, Amsterdam.
- SEETHARAMA, N.; SIVAKUMA, M.V.K.; F.R.; SINGH, S.; MAITI, R.K.; EDDY, B.V.S.; PEACOCK, J.M.; REDDY, S.J.; MAHALESKMI, V.; SACHAN, R.C.; SHIV RAJA; MURTHY, S.R.K.; NARAYANAN, A.; KANNANGARA, T.; DURLEY, R.C.; SIMPSON, G.M. 1983. *Proc. Indian Natl. Sci. Acad.*, Part B 49, 498-523.
- STEWART, C.R. & HANSON, A.D. 1980. In: TURNER, N.C.; KRAMER, P.J., eds. *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Estr ss*, pp. 173-189. Wiley (Interscience), New York.
- TURNER, N.C. 1986a. *Aust. J. Plant Physiol.* 13, 175-190.
- WESTGATE, M.E. & BASSETTI, P. Heat and drought estr ss in corn: what really happens to the corn plant at pollination? In: D. Wilkinson (ed.). *Proc. 456th Annual Corn and Sorghum Res Conf*, ASTA, Washington, pp 12-28. 1990.
- WESTGATE, M.E. & BOYER, J.S. 1986. Reproduction at low silk and pollen water potentials in maize. *Crop Sci.*, 26:951-956.