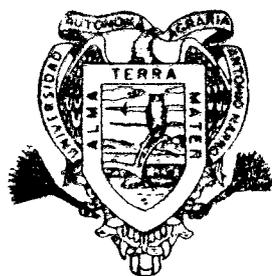


EVALUACION DE METODOLOGIAS PARA
SELECCIONAR GENOTIPOS DE MAIZ
TOLERANTES A SEQUIA

MIGUEL RIVERA GONZALEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD DE RIEGO Y DRENAJE



**Universidad Autónoma Agraria
Antonio Narro**

PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenavista, Saltillo, Coah.

MARZO DE 1988

Tesis elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada como requisito parcial, para optar al grado de

MESTRO EN CIENCIAS ESPECIALIDAD DE RIEGO Y DRENAJE

COMITE PARTICULAR

Asesor principal:

S. Muñoz Castro
Ing. M.S. Salvador Muñoz Castro

Asesor:

[Signature]
Dr. Alfonso Reyes López

Asesor:

[Signature]
Ing. M.C. Rodolfo Jasso Ibarra

Asesor:

[Signature]
Ing. M.C. J. Guadalupe Rodríguez V.



BIBLIOTEC Egidio G. Rejon BANCO DE TEJAS U.A.A.A.N.

[Signature]
Dr. Eleuterio López Pérez
Subdirector de Asuntos de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila. Marzo 1988

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a las siguientes Instituciones y personas:

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría y permitirme ser uno de sus investigadores.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo económico brindado y por la gran responsabilidad que tiene con sus becarios.

Al Dr. Luis Fernando Flores Lui, director del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta (CENID-RASPA) de Gómez Palacio, Dgo., por su apoyo incondicional y muestras de amistad.

Al Ing. MS. Salvador Muñoz Castro por su asesoría, paciencia y dedicación en la revisión de este trabajo, así como por su amistad.

Al Ing. M.C. Rodolfo Jasso Ibarra por su asesoría y sugerencias en el presente trabajo de tesis, a quien considero un amigo.

Al Dr. Alfonso Reyes López por su asesoría y sugerencias en la realización de este trabajo y su amistad.

Al Ing. M.C. Guadalupe Rodríguez, del Instituto Mexicano del Maíz, por su apoyo y revisión de este trabajo.

Al Ing. M.C. Cristina Vega Sotelo por su ayuda desinteresada, sugerencias y muestras de amistad.

Al Ing. M.C. Juan José Rojas Rangel por su apoyo y -
amistad.

Al siguiente personal del Laboratorio de Salinidad y
Relación Agua Suelo Planta de la UAAAN: Sritas. Patricia -
Fuentes Ortiz, Silvia Guerrero Martínez, Laura Fuentes Lara,
Sra. Leticia Pérez Narro, por su apoyo en el análisis físico
químico del suelo del sitio experimental, así como por su -
gran amistad.

Al personal del Laboratorio de Pomología de la UAAAN
Ing. M.C. Jesús Octavio Pimentel González, Ing. Eliseo S. -
González Sandoval y Sra. Dora Elia Guevara de Ruiz, por su -
apoyo y ayuda desinteresada.

Al Ing. Tomás Manzanares Aguirre, Sras. Ma. Elena -
González Guajardo y Guillermina Reyna Sustaita, por su apoyo
en el trabajo de laboratorio así como por su amistad.

A Carmen Leticia Ayala López, por su apoyo en el me-
canografiado de este trabajo.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro -
(UAAAN) por permitirme realizar mis estudios de maestría.

A la Escuela Superior de Agricultura y Zootecnia de
la Universidad Juárez del Estado de Durango, a quien debo -
mis conocimientos básicos de mi formación agronómica.

A la Familia Luna Dávila, por su hospitalidad y mues-
tras de amistad.

A la Srita. Leticia Rodríguez González por su cari-
ño y amistad.

DEDICATORIA

A la memoria de
mi esposa e hijo:

Elsa Letìcia y Jesùs Miguel, con profundo
amor.

A mis padres:

Severa y José, con amor y respeto.

A mis hermanos:

Marcia, Silvia, María Antonia, Inocente, Jo-
sefina, Alicia, Olidia, José Luis y María -
de Jesús, con cariño y orgulloso de que -
sean mis hermanos.

A la memoria de
mi abuelo:

Lorenzo, por su gran ejemplo e inquebranta-
ble espíritu.

A mi amigo:

Ernesto Luna Dávila, por su gran amistad.

A los CC Ing.:

Joaquín Alferez Castillo
Leopoldo Moreno Diaz
Salvador Muñoz Castro
Rodolfo Jasso Ibarra
Luis Fernando Flores Lui
con estimación y respeto.

COMPENDIO

Evaluación de Metodologías para Seleccionar
Genotipos de Maíz Tolerantes a SequíaPor
MIGUEL RIVERA GONZALEZMAESTRIA
RIEGO Y DRENAJEUNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. MARZO 1988

Ing. M.S. Salvador Muñoz Castro - Asesor -

Palabras claves: Tolerancia a sequía, índices de
stress, polietilen glicol, manito

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivos: a) evaluar metodologías de campo y laboratorio para seleccionar genotipos de maíz tolerantes a sequía, en términos de rendimiento y tolerancia a la presión osmótica, b) clasificar las líneas de maíz evaluadas en tolerantes y susceptibles a sequía, de acuerdo a los diferentes índices de tolerancia a sequía de campo y laboratorio.

La metodología de campo consistió en someter a las líneas de maíz a tres tensiones de humedad del suelo (-3, -8 y -15 bars). Con la metodología de campo se estimaron los índices de susceptibilidad a sequía, una en base a

rendimiento de grano (ISS_{rg}) y el otro en base a rendimiento biológico (ISS_{rb}). Las dos metodologías de laboratorio fueron: a) germinación de semillas en polietilén glicol 6000 (PEG₆₀₀₀) a presiones osmóticas de 0 y -2.0 MPa, b) germinación de embriones de semillas en manitol y medio nutritivo a presiones osmóticas de -0.35 y -1.0 MPa.

Se encontró que el ISS_{rg} resultó ser el índice más eficiente para clasificar las líneas de maíz en base a su tolerancia al stress hídrico en términos de rendimiento, en virtud de que se correlacionó en forma significativa con el índice de cosecha ($r = -.954^{**}$), eficiencia de área foliar ($r = -.866^*$), rendimiento de grano ($r = -.823^*$), eficiencia de uso de agua ($r = -.823^*$), así como el ISS_{rb} ($r = .889^*$).

En base al ISS_{rg} las líneas de maíz E, C y D se clasificaron como tolerantes a sequía y las líneas A, B, F como susceptibles a sequía. También se encontró asociación positiva entre el ISS_{rg} y el índice de stress de longitud de tallo (ISLT) ($r = -.832^*$).

De las dos metodologías de laboratorio evaluadas, la metodología (b) es la que ofrece perspectivas más prometedoras en virtud de que permite evaluar parámetros de plántula tales como longitud de tallo y radícula, así como materia seca de tallo y radícula y porcentaje y velocidad de germinación y así tener más parámetros de comparación.

ABSTRACT

Evaluation of Methodologies for the Selection
of Drought Tolerant Corn Genotypes

By

MIGUEL RIVERA GONZALEZ

MASTER OF SCIENCE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. MARCH 1988

M.S. Salvador Muñoz Castro. - Advisor -

Key words: Drought tolerance, stress indices,
polyethylene glycol, mannitol.

The main objectives of this study were the -
evaluation of lab and field methodologies for the selection of -
drought tolerant corn genotypes in terms of osmotic pressure
tolerance and yield, and the classification of the corn lines
evaluated with respect to drought tolerance by means of -
various drought tolerance indices.

The field methodology consisted in exposing the -
corn lines to three different levels of soil moisture -
tension (-13, -8 y -15 bars). Two drought susceptibility -
indices were derived, one for grain yield (DSI_g) and the --
other for biological yield (DSI_b). The two laboratory -

methodologies were : a) germination of corn seeds in polyethylene glycol (PEG 6 000) under at osmotic pressures of 0 and -2.0 MPa
b) germination of seeds embryos in a nutritive medium with mannitol at osmotic pressures of -0.35 and -1.0 MPa.

The DSI_g appeared to be the most efficient index for clasification of the corn lines as tolerant and sensitive t water stress on the basis of yield. This index showed a strong correlation with the harvest index ($r = -.823^*$), leaf area efficiency ($r = -.866^*$), grain yield ($r = -.823^*$), water us efficiency ($r = -.823^*$), and the DSI_b ($r = .889^*$) obtained fro the field experiment.

Based on the DSI_g three of the corn lines tried were classified as drought tolerant and three as drought sensitiv This index was strongly correlated to the stem-lenght stress index (SLSI) ($r = -.832^*$).

Of the lab methodologies evaluated, the germination of seed embryos in a nutritive medium with mannitol at -.35 and -1.0 MPa showed promise as one useful to descriminate between drought tolerant and drought sensitive varieties through the measurement of stem and radicle characteristics such as lenght and dry matter, weight, in addition to rate and percentaje of germination.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
INDICE DE CUADROS	xii
INDICE DE FIGURAS	xvi
INTRODUCCION	1
REVISION DE LITERATURA	5
STRESS HIDRICO O SEQUIA	5
RESISTENCIA AL MOVIMIENTO DE AGUA	8
EFECTOS DEL STRESS HIDRICO EN LAS PLANTAS	10
EFECTOS MORFOLOGICOS	12
EXPANSION CELULAR	12
ENRROLLAMIENTO FOLIAR	14
CRECIMIENTO RADICAL	16
EFECTOS FISIOLOGICOS	17
FUNCION ESTOMATAL	18
FOTOSINTESIS	20
TRANSLOCACION	21
MECANISMOS DE RESISTENCIA A SEQUIA	22
PARAMETROS HIDRICOS Y DE ELASTICIDAD RELACIONADOS CON SEQUIA	25
MODULO DE ELASTICIDAD VOLUMETRICA	27
CONTENIDO RELATIVO DE AGUA	29
METODOLOGIAS Y PARAMETROS UTILIZADOS PARA LA SELECCION DE GENOTIPOS TOLERANTES A SEQUIA	31
METODOS DE CAMPO	32
METODOS DE LABORATORIO E INVERNADERO	35
EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA	40
MATERIALES Y METODOS	44
EXPERIMENTO DE CAMPO	44
LOCALIZACION Y CARACTERISTICAS DEL TERRENO	44
DESCRIPCION DE TRATAMIENTOS EN ESTUDIO	47

	Página
MANEJO DEL EXPERIMENTO	47
VARIABLES DE RESPUESTA	50
INDICE DE AREA FOLIAR	50
ALTURA MAXIMA DE PLANTA	51
DIAS A FLORACION MASCULINA Y FEME- NINA	51
EFICIENCIA DE AREA FOLIAR	51
DENSIDAD ESTOMATICA	51
RENDIMIENTO DE GRANO	52
RENDIMIENTO BIOLOGICO	53
INDICE DE COSECHA	53
INDICES DE SUSCEPTIBILIDAD A SEQUIA	53
METODOLOGIAS DE LABORATORIO	54
GERMINACION DE SEMILLAS EN POLIETI LEN GLICOL 6000 (PEG ₆₀₀₀) A PRESIO- NES OSMOTICAS DE 0 y -2.0 MPa. . .	55
GERMINACION DE EMBRIONES DE SEMI - LLAS EN MANITOL Y MEDIO NUTRITIVO A PRESIONES OSMOTICAS DE -.35 y -1.0 MPa.	57
RESULTADOS Y DISCUSION	62
EXPERIMENTO DE CAMPO	62
VARIABLES DE RESPUESTA	62
INDICES DE SUSCEPTIBILIDAD A SEQUIA	63
COEFICIENTES DE CORRELACION . . .	65
METODOLOGIAS DE LABORATORIO	66
GERMINACION DE SEMILLAS EN POLIETI LEN GLICOL 6000 (PEG ₆₀₀₀) A PRESIO- NES OSMOTICAS DE 0 Y -2.0 MPa. . .	66
GERMINACION DE EMBRIONES DE SEMI - LLAS EN MANITOL Y MEDIO NUTRITIVO A PRESIONES OSMOTICAS DE -.35 Y -1.0 MPa.	69
CORRELACION ENTRE LOS INDICES DE STRESS DE CAMPO Y LABORATORIO	71
CONCLUSIONES	79

	Página
RESUMEN	81
LITERATURA CITADA	84
APENDICE	94

INDICE DE CUADROS

Cuadro No.		Página
2.1	Sensibilidad a deficiencias de agua de algunos procesos o parámetros de la planta . . .	11
3.1	Propiedades físicas y químicas del suelo - en el sitio experimental	45
3.2	Riegos y láminas aplicadas a los diferentes tratamientos de humedad	49
3.3	Soluciones utilizadas para preparar el medio nutritivo Murashige y Skoog (M.S.) . . .	58
3.4	Volumen de las diferentes soluciones para preparar un litro de medio nutritivo M.S. .	59
4.1	Valores de f calculada (f_c) y f tabulada - (f_t) de los análisis de varianza para las variables IAF, AMP, DFM, DFF, EAF, DE, RG, RB e IC	63
4.2	Análisis de varianza del índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento de grano (ISS_{rg}) al 15 por ciento de humedad - para las líneas de maíz A, B, C, D, E y F .	64
4.3	Análisis de varianza del índice de susceptibilidad a sequía en base a producción de materia seca (ISS_{rb}) para las líneas de maíz A, B, C, D, E y F	64

Cuadro No.		Págin
4.4	Coeficientes de correlación entre los índices de susceptibilidad a sequía de campo - contra las variables de respuesta	66
4.5	Concentración de elementos químicos en una muestra de polietilen glicol 6000	67
4.6	Análisis de varianza para el índice de - stress en germinación (ISG)	68
4.7	Análisis de varianza para el porcentaje de germinación total de las líneas de maíz en PEG _{6 000} a una presión osmótica de -2.0 MPa. .	68
4.8	Valores de f_c y f_t de los análisis de va - rianza para los índices ISLR, ISLT, ISMST e ISMSTo.	70
4.9	Clasificación de las líneas de maíz de - acuerdo a los diferentes índices de stress (DUNCAN, $\alpha = 0.05$)	71
4.10	Coeficientes de correlación entre el índi - ce de susceptibilidad a sequía en base a - rendimiento de grano (ISS_{rg}) y los índices de stress de laboratorio	71
4.11	Clasificación de las líneas de maíz de - acuerdo a los índices de susceptibilidad a sequía de campo y laboratorio, y coeficien - tes de correlación con las variables de - campo	76
1.A	Índice de área foliar (IAF)	95
2.A	Altura máxima de la planta (AMP), en cm . .	95

Cuadro No.		Página
3.A	Días a floración masculina (DFM) a partir de la fecha de siembra	96
4.A	Días a floración femenina (DFF) a partir de la fecha de siembra	96
5.A	Eficiencia de área foliar (EAF), kg/m ² . .	97
6.A	Densidad estomática (DE), número de estomas/mm ²	97
7.A	Rendimiento de grano (RG) al 15.5 por ciento de humedad en toneladas/hectárea . . .	98
8.A	Materia seca total (RB) en toneladas/hectárea	98
9.A	Índice de Cosecha (IC)	99
10.A	Comparación de medias (Duncan $\alpha = 0.05$) - del índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento de grano (ISS _{rg}) al 15.5 por ciento de humedad	100
11.A	Comparación de medias (Duncan $\alpha = 0.05$) - del índice de susceptibilidad a sequía en base a materia seca (ISS _{rb})	100
12.A	Eficiencia de uso del agua (EUA) kg de ms de grano/m ³ de agua aplicada	101
13.A	Porcentajes de germinación total e índice de stress en germinación (ISG) a una presión osmótica de -2.0 MPa, simulada con PEG _{6 000}	102

Cuadro No.		Página
14.A	Comparación de valores medios del índice - de stress en germinación (ISG) para las lí- neas de maíz A, B, C, D, E y F (Duncan, - $\alpha = 0.05$)	103
15.A	Comparación de valores medios del porcenta- je de germinación total de las líneas de - maíz A, B, C, D, E y F a una presión osmó- tica de -2.0 MPa simulada con PEG 6 000 (Dun- can, $\alpha = 0.05$)	103
16.A	Indices de stress (ISLR, ISLT, ISMSR, ISMST, ISMSTo) en manitol y medio nutritivo, a una presión osmótica de -1.0 MPa	104

INDICE DE FIGURAS

Figura No.		Página
2.1	Clases de stress ambiental al que un organismo puede verse sujeto	6
2.2	Resistencia al movimiento del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera	10
2.3	Dos ciclos importantes para el control de la apertura estomatal	19
2.4	Tres métodos de aplicar el riego para diferenciar la condición de humedad favorable de la condición de sequía	33
3.1	Curva característica de retención de humedad del sitio experimental. Estrato (0-30 cm)	46
3.2	Precipitación mensual durante el desarrollo del cultivo (Estación: Buenavista, Coah.)	49
4.1	Porcentaje de germinación de las líneas de maíz A, B, C, D, E y F sometidas a una presión osmótica de -2.0 MPa simulada con PEG 6 000	69
1.A	Distribución y arreglo de tratamientos en el sitio experimental	105

INTRODUCCION

La necesidad de resolver los problemas que afectan a la agricultura de temporal en nuestro país es prioritaria, ya que de las 23'138,405 ha susceptibles de cultivar, el 80.4 por ciento corresponden a terrenos de temporal y sólo participan con el 60 por ciento del valor de la producción. Dentro de este sistema de producción, el cultivo del maíz tiene un lugar primordial, ya que a nivel nacional se siembran 7'420,623 ha, de las cuales 6'497,535 ha son bajo condiciones de temporal, con un rendimiento medio de 1.188 ton/ha.

La sequía es uno de los factores ambientales que mayormente limita la productividad de los cultivos en la mayoría de las áreas temporaleras y es definida como la ausencia o escasez de precipitación que afecta a este tipo de agricultura en diferente grado según la época en que se presenta, de su intensidad y duración. En nuestro país se estima que cada año se pierden cosechas de un 23 a 37 por ciento del área sembrada por efecto de sequía.

Una de las estrategias para contrarrestar los efectos de la sequía es la utilización de líneas o variedades -

de cultivos tolerantes a la misma. La identificación en la planta de mecanismos de tolerancia a sequía se manifiesta básicamente a través de la morfología que, a su vez, está determinada por complicados procesos fisiológicos que son el fundamento de dicha resistencia.

Los genetistas generalmente seleccionan para tolerancia a sequía comparando la producción de genotipos durante los años en que ocurre sequía. Sin embargo, este procedimiento es muy largo y no está diseñado para identificar las características morfológicas y fisiológicas de las plantas que están asociadas con dicha tolerancia.

Entre los trabajos sobre tolerancia a sequía destacan aquéllos encaminados a encontrar métodos de laboratorio e invernadero que hagan innecesario recurrir a experimentos en el campo, ya que en éstos no hay la seguridad de contar con los períodos de sequía experimentalmente requeridos. Tales métodos también pueden contribuir a estudios básicos en la naturaleza de la tolerancia a la sequía.

La problemática identificada durante el taller de sequía efectuado en la ciudad de México en 1983, en cuanto a resistencia a sequía, fué la siguiente:

- Existe heterogeneidad en cuanto a metodología de selección para resistencia a sequía.
- En la actualidad se cuenta con una serie de metodologías o técnicas para la identificación y

selección de genotipos tolerantes a sequía, las cuales no han sido evaluadas para diferentes cultivos.

- La utilización de genotipos híbridos en temporal ha tenido poca aceptación, debido a la dependencia de las casas proveedoras de semilla que su uso implica.
- Es indispensable investigación básica para el estudio de mecanismos morfológicos y fisiológicos de los materiales genéticos tolerantes a sequía.

De acuerdo a esta problemática, se propuso el presente proyecto de investigación, cuyos objetivos son los siguientes:

- Evaluar metodologías de campo y laboratorio para la selección de genotipos de maíz tolerantes a sequía en términos de rendimiento y tolerancia a la presión osmótica.
- Evaluar algunas características morfológicas e índices de crecimiento que nos den una indicación satisfactoria de la tolerancia a sequía en base a rendimiento y eficiencia de uso del agua.
- Clasificar las líneas de maíz evaluadas en tolerantes y susceptibles a sequía de acuerdo a los diferentes índices de tolerancia a sequía de campo y de laboratorio.

Para lo anterior, se establecen las siguientes hipótesis:

- Es factible seleccionar genotipos de maíz tolerantes a sequía, mediante metodologías de laboratorio y campo, simulando condiciones de sequía (stress hídrico).
- Los diferentes genotipos a estudiar han desarrollado adaptaciones morfológicas y fisiológicas que los hacen tolerantes al stress hídrico, por lo que se pretende detectar dichas adaptaciones probando diferentes metodologías.

REVISION DE LITERATURA

La respuesta de las plantas a las severidades del medio ambiente ha ocupado la atención del hombre desde los inicios de la Biología como ciencia (Levitt, 1972). Para el agricultor, las plantas que sobreviven en estos ambientes son fuertes o resistentes y débiles aquéllas que no sobreviven. El científico, sin embargo, requiere una terminología más cuantitativa. Por lo tanto, en años recientes, los biólogos han adoptado el término stress para cualquier factor ambiental potencialmente desfavorable a los organismos vivos, y resistencia al stress, para la habilidad de la planta de sobrevivencia ante el factor desfavorable.

Un stress biológico es definido como cualquier factor ambiental capaz de inducir una tensión potencialmente dañina en los organismos vivos (Levitt, 1972). El stress biológico puede ser biótico o fisicoquímico, como se muestra en la Figura 2.1.

STRESS HIDRICO O SEQUIA

Numerosas han sido las definiciones sobre sequía (Levitt, 1972; Shaw, 1977; Kramer, 1980; Jones *et al.* 1981; Kriegg y Hutmacher, 1982; Fischer *et al.* 1983).

Kramer (1980) menciona que la siguiente definición es la más comunmente aceptada: "la sequía es un stress ambiental de suficiente duración para producir un déficit o stress de agua en la planta, el cual causa disturbios en los procesos fisiológicos".

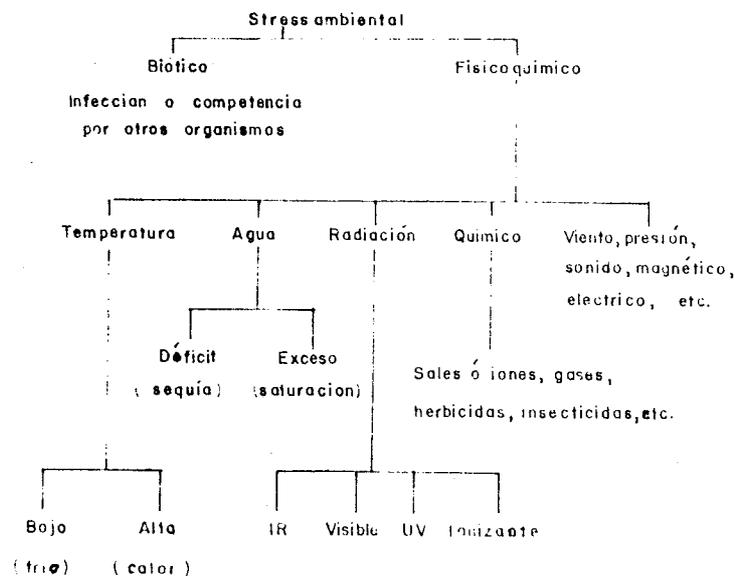


Figura 2.1. Clases de stress ambiental al que un organismo puede verse sujeto. (Levitt, 1972).

Vaadia (1984) define el stress hídrico como el nivel energético del agua en la planta que limita el intercambio de vapor de agua y CO_2 , afectando la producción de materia seca. De ser muy severo el stress hídrico, puede ocasionar la muerte.

Por lo general, todas las plantas se ven sujetas a algún grado de stress hídrico durante su ciclo vegetativo. Aún las plantas que crecen en suelos húmedos (suelos a

capacidad de campo) desarrollan déficits moderados de agua - en días calurosos. Esto ocurre porque el equilibrio hídrico interno y el grado de stress hídrico, depende de la relación entre absorción y pérdida de agua. No es sorprendente que - las tasas de estos procesos controlados por distintas series de factores no estén perfectamente sincronizados pues existe siempre un desbalance entre la absorción de agua por las - raíces y la transpiración de las plantas, debido a la alta - resistencia al movimiento de agua a través de la planta - (Kramer, 1980).

El stress hídrico se desarrolla de la siguiente manera: los déficits hídricos en la planta son causados por la - remoción de agua del tejido de la planta para compensar la - diferencia entre pérdida y absorción de agua, y son eliminados durante la noche, cuando la absorción de agua excede la pérdida de agua. Sin embargo, a medida que se agota la humedad del suelo, la absorción se torna más lenta y el déficit va aumentando, hasta que finalmente ocurre el marchitamiento permanente (Slatyer, 1967; Kramer, 1974; Salisbury y Ross, - 1978).

Kramer (1974) menciona que la tensión hídrica de las plantas se debe a un pérdida excesiva, a una inadecuada absorción de agua, o de ambas. La pérdida de agua por transpiración es la causa fundamental de los déficits hídricos temporales del medio día. Sin embargo, la absorción reducida provocada por una disponibilidad menguante del agua del suelo, es la causa de los prolongados y graves períodos de tensión

hídrica que causan las más grandes reducciones de crecimiento de las plantas.

El agua se mueve del suelo hacia la planta, debido a gradientes de energía, expresados en potenciales hídricos decrecientes. Si el potencial del suelo tiende a valores más negativos se desarrollarán déficits en el interior de la planta, y éstos también se incrementan con la demanda atmosférica (Slatyer, 1967) que siempre tiene valores menores que la planta, por ejemplo, si el suelo tiene un potencial de -1.5 MPa a marchitez permanente, la atmósfera con un 80 por ciento de humedad relativa y 20 grados centígrados de temperatura, tiene un potencial de -30 MPa. Por esto en zonas áridas este potencial alcanza fácilmente valores de -100 MPa, que significa una enorme demanda atmosférica (Nuñez, 1984), sin embargo, el agua de la planta no se pierde por gradientes de energía, sino por diferencias en la presión de vapor existentes entre la cavidad estomática y la atmósfera. La presión del ambiente se duplica por cada 10 grados centígrados de incremento en la temperatura. Por ejemplo, si la atmósfera tiene 100 por ciento de humedad relativa (Hr) y 20 grados de temperatura, tendrá 50 por ciento si se incrementa la temperatura del aire a 31 grados centígrados. En otras palabras, el aire caliente puede retener más agua que el aire frío (Nuñez, 1984).

RESISTENCIA AL MOVIMIENTO DEL AGUA

Por muchos años se ha discutido acerca de la -

magnitud e importancia de las resistencias al flujo del agua, tanto en el suelo como en la planta. Newman (1969) en un trabajo de revisión, cuestionó la validez de algunos experimentos que pretendían demostrar que la mayor resistencia al movimiento de agua se encontraba en el suelo, aún cuando el contenido de humedad de éste estuviera muy por encima del punto de "marchitamiento permanente". Este investigador también encontró que la resistencia del suelo es importante cuando éste llega a un potencial de -1.5 MPa.

Por otro lado, una de sus principales objeciones a los trabajos revisados fue que consideraba que la resistencia de la planta permanecía constante, a medida que el suelo se secaba. Tal aseveración es errónea debido a que la resistencia de la planta también se incrementa cuando el suelo pierde agua. Por ejemplo, bajo condiciones de sequía, las membranas celulares se vuelven más impermeables (Russell, 1977) la conductancia estomatal disminuye (Raschke, 1975) y se produce un espacio entre la raíz y el suelo, ya que al perder turgencia la planta, los diámetros radicales decrecen formándose así una resistencia adicional (Tinker, 1980) la discontinuidad de las columnas de agua en los vasos conductores es una resistencia adicional que se encuentra dentro de la planta bajo condiciones de sequía (Milburn y Johnson, 1966). En resumen, la importancia y magnitud de las resistencias en la planta son cada vez más claras; sin embargo, aún existe la duda sobre donde, dentro del sistema vascular, se encuentra la mayor resistencia al flujo del

agua (Nuñez, 1984). En la Figura 2.2 se muestra una representación diagramática del pasaje del agua del suelo a la atmósfera a través de la planta; las flechas indican las resistencias más importantes.

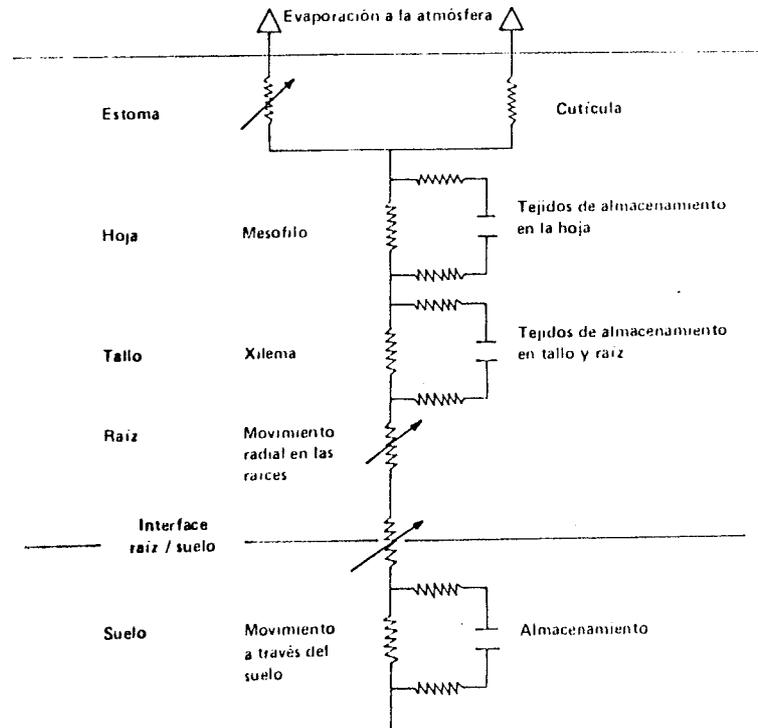


Figura 2.2. Resistencia al movimiento del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera (Nuñez, 1984).

EFFECTOS DEL STRESS HIDRICO EN LAS PLANTAS

Diversos trabajos publicados, hasta ahora indican - que casi cualquier constituyente o proceso en la planta puede ser afectado si el stress hídrico es severo. En el Cuadro 2.1 se muestra la sensibilidad de diferentes procesos de la planta al stress hídrico. La disminución es el potencial hídrico total (Ψ), es usada en este cuadro para describir el grado de stress hídrico, debido a que el Ψ es el indicador más común que se usa en dichos estudios. Aunque -

el Ψ no es un buen indicador de un stress hídrico (Godoy, 1983).

El efecto primario de un stress hídrico se manifiesta en la reducción del crecimiento celular ya que la presión de turgencia (Ψ_p) es un prerrequisito para la elongación de la célula. Muchas de las alteraciones en el metabolismo asociadas con un stress pueden ser resultados indirectos de un crecimiento reducido (Godoy, 1983).

Cuadro 2.1. Sensibilidad a deficiencias de agua de algunos procesos o parámetros de la planta (Hsiac et al. 1976).

PROCESO O PARAMETRO AFECTADO	SENSIBILIDAD A UNA DEFICIENCIA			REFERENCIA
	Muy sensitiva		Insensitiva	
	Reducción en el potencial del tejido requiere rida para afectar el proceso.			
	0	1	2 mm	
Crec. Celular (-)	-----			Acevedo et.al. 1971
Síntesis de la pared (-)	-----			Cleland 1967
Síntesis de proteínas (-)	-----			Hsiao 1970
Nivel de Nitrato Reduc. (-)	-----			Huffaker et. al. 1970
Apertura estomatocítica (-)	-----	-----	-----	Revisión por Hsiao 1970
Asimilación de CO ₂ (-)	-----	-----	-----	Revisión por Hsiao 1970
Respiración (-)	-----	-----	-----	
Conduct. del Xilema (-)	-----	-----	-----	Bover 1971
Acumulación A.A.B. (+)	-----			Zabaijal 1974; Beardell 1974
Acumulación de prolina (+)	-----	-----	-----	
Nivel de azúcares (+)	-----	-----	-----	

El stress hídrico en las plantas causa el cierre de los estomas, lo cual reduce la pérdida de agua, pero el cierre de los estomas también interfiere en la entrada de

CO₂, lo cual es indispensable porque reduce la fotosíntesis. El stress hídrico en la planta reduce indirectamente la fotosíntesis ya que causa un cierre de estomas, posteriormente, si el stress continúa, ocurre un daño bioquímico en las células, por ejemplo, reducción de la ribulosa biofosfato - carboxilasa, reducción en la síntesis de proteínas, y en la reducción de enzimas necesarias para diferentes procesos fisiológicos. Si el stress continúa, causa reducción foliar a través de defoliación (Hsiao, 1973).

EFFECTOS MORFOLOGICOS

Expansión Celular

El crecimiento y desarrollo de la planta depende básicamente de la división celular, de la progresiva iniciación del tejido y de la diferenciación y alargamiento de las células hasta que la planta completa su forma característica. Se ha establecido que la división celular es menos susceptible que el alargamiento celular. Cuando la planta sufre deficiencias hídricas (Vaadia *et al.*, 1961; Hsiao, 1973) el número de células es generalmente el mismo en plantas bajo sequía, que en plantas con suministro adecuado de agua. Además, se ha observado (Acevedo *et al.*, 1971) que las plantas bajo condiciones de sequía tienen un mayor crecimiento, en comparación con el testigo después de que son regadas. Esto se explica en gran parte por la continuidad del proceso de división celular durante el período de sequía.

La sensibilidad del alargamiento celular a la sequía ha sido claramente demostrada por los trabajos realizados en maíz (Boyer, 1970; Hsiao *et al.*, 1976; Acevedo *et al.*, 1971). La expansión foliar, bajo condiciones de invernadero, decrece rápidamente cuando el potencial hídrico de la hoja es de -0.2 MPa y cesa a potenciales de -0.7 a -0.9 MPa bajo condiciones de campo. Sin embargo, no se reduce la expansión foliar hasta que los potenciales hídricos alcanzan valores de -0.8 a -0.9 MPa (Watts, 1974) esta aparente sensibilidad del maíz bajo condiciones de campo, se debe probablemente a diferencias en ajustes osmóticos por un acondicionamiento más progresivo de las plantas al déficit hídrico.

Una consecuencia importante de la sensibilidad del alargamiento celular a la sequía, es la marcada reducción en el área foliar, la cual está altamente correlacionada con la intercepción de energía solar y, consecuentemente, con la producción de materia seca.

La energía solar interceptada es una función exponencial del índice de área foliar, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$I = I_0 e^{-K (IAF)} \quad (2.1)$$

donde: I = intensidad de la luz después que pasa a través del cultivo

IAF = índice de área foliar

I_0 = intensidad de la radiación incidente

K = coeficiente de extinción

Bajo condiciones de sequía, una reducción del área foliar también resulta en un decremento de la producción de materia seca, sobre todo en la etapa vegetativa de rápido crecimiento. Por otra parte, al disminuir la superficie foliar, aumentan las posibilidades de sobrevivencia de la planta a las tensiones hídricas impuestas por la sequía. Esto se debe en gran parte, a que la superficie de transpiración también se ve reducida, con lo que se disminuye la cantidad de agua que se pierde a través de este proceso. Tal es un mecanismo de adaptación a la sequía (Nuñez, 1984).

Enrollamiento Foliar

Hay evidencias de que el enrollamiento foliar reduce la transpiración de algunas especies, como en la mayoría de los pastos de las regiones del mediterráneo. Estos bajan su tasa transpiratoria de un 60 a 70 por ciento cuando las hojas se enrollan durante períodos de sequía (Oppenheimer y Engelberg, 1965). Sin embargo, en contraste con esta información, algunos investigadores no han podido demostrar la utilidad de este fenómeno. En muchas especies el enrollamiento de las hojas no ocurre hasta que la cantidad de agua en la planta se ve reducida a niveles letales.

Fischer (1983) concluye que un índice de selección basado en la elongación relativa de la hoja, el intervalo entre la dehiscencia del polen y la aparición de los

estigmas, temperatura del follaje, pérdida del área foliar y rendimiento de grano bajo condiciones de riego y sequía - en ocho genotipos de maíz, resultó en una ganancia máxima - de rendimiento por ciclo bajo condiciones de sequía de un - 9.5 por ciento.

La medición de la elongación foliar relativa fue hecha cuando las plantas en el tratamiento de limitación severa de agua, mostraban enrollamiento foliar al mediodía; se midió la altura desde el suelo hasta la hoja más joven visible en el verticilio (cogollo). La medición se repitió una semana después en la misma hoja. Estas mediciones fueron hechas en seis plantas por parcela, tanto en los tratamientos regados como en los de limitación de agua. La extensión (que incluye componentes de elongación del tallo y de la vaina tanto como de elongación foliar) bajo sequía fue expresada relativa a la extensión bajo condiciones no limitantes de agua para liberarla de diferencias genéticas en tasa de elongación bajo condiciones no limitantes. La elongación foliar relativa (EFR) es:

$$EFR = \frac{(AS_7 - AS_0)}{(AR_7 - AR_0)} \times 100 \quad (2.2)$$

donde: AR_7 = altura a la punta de la hoja bajo riego en el día 7

AR_0 = altura a la punta de la hoja bajo riego en el día 0

AS_7 = altura a la punta de la hoja bajo sequía en el día 7

AS_0 = altura a la punta de la hoja bajo sequía en el día 0

También menciona que la elongación relativa de la hoja y la temperatura del follaje y el intervalo entre la dehiscencia del polen y la aparición de los estigmas pueden ser medidos antes de la polinización y cuando se combinaron explicaron el 54 por ciento ($r^2 = 0.54$) de la variación del rendimiento de grano bajo condiciones de sequía.

Crecimiento Radical

Aunque el crecimiento total de la planta es menor - bajo condiciones de sequía, el desarrollo radical es generalmente mayor en relación con la parte aérea de la planta.

La variación de humedad del suelo en diferentes horizontes es uno de los principales factores que determinan la distribución de raíces en un suelo uniforme con referencia a niveles de humedad, fue presentada por Klepper, - 1970 con el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum* L.).

Al iniciar el experimento el suelo tenía un potencial hídrico de -0.01 MPa, bajo estas condiciones, la densidad radical decreció de la superficie hacia abajo; no obstante durante el ciclo de secado, cuando el agua se perdía más rápidamente en las capas superiores, el patrón de distribución de raíces se invirtió. La densidad radical en la superficie seca del suelo decreció debido a la muerte por - desecación. mientras una importante proliferación ocurrió -

en capas más profundas, donde el agua era aún más aprovechable. Cabe aclarar que este tipo de distribución raramente ocurre en el campo, ya que bajo condiciones naturales existen otros factores restrictivos al crecimiento radical, como son la densidad y estructura del suelo en los diferentes horizontes.

Hurd (1976) revisó muchos casos en los que la limitación de agua en la planta disminuyó con el aumento en la profundidad y ramificación de las raíces. Puede haber, sin embargo, algunas condiciones ecológicas en las que un crecimiento radical reducido, particularmente temprano en el ciclo del cultivo, es una ventaja (Passioura, 1972).

Lorens *et al.* (1987) en un estudio comparativo de dos híbridos de maíz difiriendo en su resistencia a sequía encontró que el híbrido 3165 tuvo un desarrollo radicular más profundo y más extensivo que el híbrido 3192 bajo condiciones de precipitación y déficit hídrico en el estado vegetativo; concluye que esta característica pudo haber contribuido a mantener el potencial del agua en la hoja y el potencial de presión durante el período de déficit de agua.

EFFECTOS FISIOLÓGICOS

El agua, como es sabido, juega un papel esencial en todas las funciones fisiológicas de la planta. Por ejemplo, sirve como un reactante en numerosos procesos metabólicos (incluyendo la fotosíntesis) como un medio de estabilización

y funcionamiento de membranas y enzimas, así como para la ionización y transporte de fotosintatos. Por otro lado, es un elemento para inflar y mantener la rigidez en la estructura de células y tejidos.

Función Estomatal

Los estomas desempeñan dos funciones importantes en la planta:

- 1) Permiten la entrada de CO_2 a la hoja para mantener un nivel adecuado de fotosíntesis, y
- 2) Controlan la pérdida de agua debida a la transpiración.

Estas dos actividades le causan un dilema a la planta, debido a que la asimilación de CO_2 de la atmósfera requiere un constante intercambio de gases, por otro lado, la prevención de una pérdida excesiva de agua demanda que ese intercambio de gases sea mantenido a un nivel bajo (Nuñez, 1984).

En las plantas superiores, este dilema ha sido parcialmente resuelto a través de la evolución de una epidermis cubierta con una cutícula de baja permeabilidad, tanto para vapor de agua, como para CO_2 ; además, se han desarrollado dos mecanismos de control estomatal que responden tanto a las concentraciones de CO_2 como a las pérdidas de agua. Cuando el CO_2 decrece en los espacios intercelulares, los -

iones potasio emigran a las células guarda del estoma, las cuales se inflan y abren permitiendo la difusión de CO_2 dentro de la cavidad estomatal.

Por otro lado, a medida que las tensiones hídricas se desarrollan dentro de la planta, el ácido abscísico (AAB) empieza a aparecer en el agua de los vasos conductores, moviéndose hacia las células guarda; esto causa el cierre estomatal y, al parecer, puede sobrepasar cualquier efecto de abertura iniciado previamente por las concentraciones de CO_2 en los espacios intercelulares. Los dos mecanismos se representan gráficamente en la Figura 2.3.

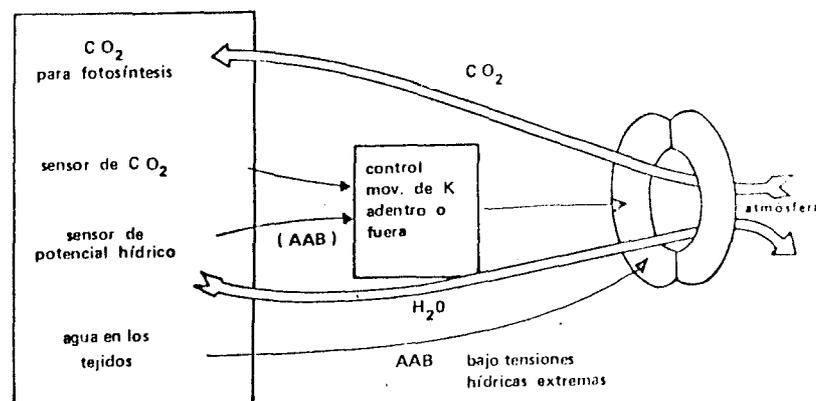


Figura 2.3. Dos ciclos importantes para el control de la apertura estomatal (Nuñez, 1984).

Conjuntamente con estos dos mecanismos básicos, existe una serie de factores, como temperatura, radiación solar, tipo de luz, etc., que afecta el movimiento estomatal. Estos fueron discutidos en detalle por Raschke en 1975.

Muñoz *et al.* (1983) en un estudio de variedades

sintéticas de maíz, con grados diferentes de resistencia a sequía, encontró que en las variedades sintéticas seleccionadas bajo sequía aumentó la sensibilidad estomática, lo que permitió un cierre estomático a más altos potenciales hídricos (-3.5 barios) reduciendo así la transpiración de manera más pronunciada al descender el potencial hídrico de la hoja.

En las variedades sintéticas seleccionadas bajo condiciones favorables de humedad, se redujo la sensibilidad estomática, lo que dió lugar a un cierre estomático a más bajos potenciales hídricos (-6 barios) y más transpiración que en los sintéticos obtenidos bajo sequía en igualdad de potenciales hídricos de la hoja abajo de -3.5 barios. Se consideró razonable denominar como hipersensibilidad estomática a la mayor capacidad de cierre estomático de las variedades sintéticas obtenidas bajo sequía a más altos potenciales hídricos.

Fotosíntesis

Debido a que los estomas actúan como reguladores en el intercambio de CO_2 entre la planta y la atmósfera, cualquier deficiencia hídrica suficiente para cerrar los estomas, disminuirá el nivel de fotosíntesis. Se ha aceptado que la reducción inicial en fotosíntesis, bajo deficiencia de agua en el suelo o en la planta, se debe principalmente a cambios en la conducción de CO_2 a través de los estomas (Kriedemann y Smart, 1971) por otro lado, bajo

condiciones de sequía, se puede dar una acumulación de fotosintatos, suficientes para limitar el proceso fotosintético ya que la demanda de éstos por la planta se ve limitada a disminuir sustancialmente su crecimiento.

Boyer (1970) encontró que las tasas de fotosíntesis en maíz fueron inhibidas siempre que el potencial de agua de la hoja bajo de -3.5 bars. Las diferencias en el comportamiento fotosintético pudieron ser atribuidas solamente a diferencias en el comportamiento estomático debajo de potenciales de agua en la hoja de -16 bars en soya y -10 bars en maíz.

Translocación

El movimiento de fotosintatos, de los sitios de asimilación a los de almacenamiento y utilización, es afectado por la cantidad asimilada, la cantidad utilizada y la carga y descarga de éstos en los elementos de transporte. El efecto de sequía (directo o indirecto), en cualquiera de estos procesos, repercute en la translocación total de la planta.

Wardlaw (1967) mostró que la velocidad en el movimiento de fotosintatos en el sistema vascular del trigo, es poco afectada por sequía hasta que el potencial hídrico de la planta llega a valores de -3.0 MPa.

La sequía, sin embargo, puede tener efectos indirectos sobre traslocación. Por ejemplo, la disminución del crecimiento foliar es una consecuencia de la reducción en la

translocación de fotosintatos o, cuando el crecimiento en las espigas de trigo es menos susceptible a la sequía que fotosíntesis, la reducción que se presenta en la recarga de productos fotosintéticos en el sistema vascular, es el factor más importante para la translocación de los productos derivados de la fotosíntesis.

En conclusión, los problemas de translocación que se han observado bajo condiciones de sequía, son el resultado de una reducción en la fotosíntesis o en los órganos de almacenamiento, y no un efecto directo en el sistema de conducción. Por último, hay algunas evidencias de que la translocación de carbohidratos a los sitios de reserva se incrementa bajo sequía (Fischer y Turner, 1978).

MECANISMOS DE RESISTENCIA A SEQUIA

La resistencia a sequía en un sentido agrícola se refiere a la capacidad de una planta cultivada para rendir su producto económico con agua disponible limitada. En un contexto evolutivo, sin embargo, resistencia a sequía normalmente sería la capacidad de una planta o de una especie para sobrevivir y, eventualmente, reproducirse bajo humedad limitada.

Jones *et al.* (1981) menciona que el término resistencia a sequía, aplicado a las plantas cultivables, es normalmente usado para cubrir un rango de mecanismos por los cuales las plantas resisten, crecen y producen satisfactoriamente

en áreas expuestas a sequía periódica.

Nuñez (1984) establece que resistencia a sequía es un término general que describe la habilidad de una planta para sobrevivir a las deficiencias hídricas del suelo y de la atmósfera y que no hay una forma universal por la cual un cultivo alcance la resistencia a sequía.

Levitt (1972) sugirió que los mecanismos para resistencia a sequía (usado en sentido general) son divididos en mecanismos de escape a la sequía, de evitación a la sequía y de tolerancia a la sequía. El escape a la sequía tiende a minimizar la interacción de la sequía con el crecimiento del cultivo, es decir, las plantas completan su ciclo de vida rápidamente; esto es, cuando las condiciones de humedad son aún favorables (Nuñez, 1984) la evasión a sequía aumenta la capacidad para mantener una condición relativamente alta de la planta, a pesar de la insuficiencia de humedad en el ambiente (O'Toole y Chang, 1979; Fischer y Turner, 1978) Nuñez, 1984 menciona que los cultivos que utilizan el mecanismo de evasión, intentan retener un nivel normal de agua en los tejidos durante condiciones de sequía; el cierre estomatal es una parte importante de este mecanismo.

Levitt (1972) menciona que la tolerancia proporciona la capacidad para producir a pesar de limitaciones en la condición de humedad de la planta. Nuñez (1984) menciona que las plantas que toleran la sequía, alteran sus tejidos de tal manera que resisten un alto grado de deshidratación,

recuperándose cuando el agua vuelve al sistema.

Kramer (1980) divide a la tolerancia en dos partes: postergación y tolerancia a la deshidratación. La primera - ocurre a través de modificaciones morfológicas que reducen la transpiración e incrementan la absorción: cutícula espesa, enrollamiento foliar en gramíneas, marchitamiento en girasol, respuesta estomatal, sistema radicular profundo y ajuste osmótico, son ejemplos de este mecanismo.

Sobre tolerancia a la deshidratación sin daño permanente, varía ampliamente dependiendo del proceso afectado - del estado de desarrollo, la duración del stress y la especie.

Turner y Kramer (1980), señalan que los mecanismos de adaptación al stress hídrico pueden ser divididos en - adaptaciones morfológicas y fisiológicas.

Las adaptaciones morfológicas más estudiadas según Wiebe (1980) son las de hojas y raíces. Begg (1980) dice - que las adaptaciones morfológicas al stress pueden ser: - a) permanentes, producción de hojas pequeñas, cambios anatómicos en las hojas y senescencia o sombreado de hojas viejas; b) temporales, que involucran cambios en el ángulo foliar y orientación. Kriegg y Hutmacher (1982) están de acuerdo en que la reducción del área foliar, cambios en la anatomía de la hoja y control estomatal, son mecanismos de adaptación al stress hídrico.

Castro (1987) menciona que los mecanismos morfológicos de adaptación al déficit hídrico, son el área foliar, - la cual disminuye bajo condiciones de sequía; volumen de raíces que es mayor bajo condiciones de sequía; longitud y - profundidad de raíces.

La mayoría de las plantas que pueden resistir sequía poseen mecanismos, tales como un sistema de raíces profundo y bien ramificados (Turner y Begg, 1981; Sullivan, 1983).

PARAMETROS HIDRICOS Y DE ELASTICIDAD RELACIONADOS CON SEQUIA

La relación entre el contenido relativo de agua (CRA) de las hojas y el potencial total de agua (Ψ) y sus componentes, potencial osmótico (Ψ_s) y potencial de presión (Ψ_p) se hacen necesarios para conocer cómo las plantas responden a una deficiencia hídrica, además, este tipo de relaciones permite estimar otros parámetros como es el módulo de elasticidad (E) de la pared celular, la proporción de agua osmótica y la no osmótica.

El potencial hídrico puede definirse como la expresión derivada de las leyes de la termodinámica que cuantifica la energía libre disponible para realizar trabajo en relación al volumen parcial molar de dicha sustancia.

Existe un potencial hídrico crítico en la hoja donde ésta tiende a cerrar sus estomas para evitar que mayor pérdida de agua pueda reducir la presión de turgencia al -

punto en el cual no ocurre elongación celular. Entonces, entre mayor sea el potencial hídrico crítico en la hoja, na -
yor será la pérdida de agua. Por lo tanto, debido a que el
potencial crítico cambia a través del ciclo de vida de la
planta, y varía entre las diferentes especies se debe de
tomar en consideración esta característica fisiológica.

Algunas plantas, cuando están sujetas a condiciones
de stress hídrico durante su desarrollo, presentan una redu
cida sensibilidad a la sequía; este fenómeno es el acondi -
cionamiento a sequía, y un aspecto importante de este fenón
meno es la habilidad de mantener la turgencia de las célu -
las a pesar de la pérdida de agua en los tejidos o reduc -
ción del potencial hídrico (Cutler *et al.* 1977).

Por otro lado, los cambios pequeños en el potencial
de presión (Ψ_p) son vistos como el medio más probable por -
el que una planta transfiera los cambios en su estado hídri
co en cambio en su metabolismo. Por lo tanto, la conserva -
ción del Ψ_p durante un cambio en el estado hídrico de la
planta, deberá conservar los procesos metabólicos de la
planta y ayudar en su crecimiento y supervivencia (Turner y
Jones, 1980).

En plantas superiores el Ψ_p a un determinado poten
cial hídrico, depende del potencial osmótico (ajuste osmóti
co) y la elasticidad de la pared celular. El potencial osmó
tico y la elasticidad son a su vez, influidos por otros fac
tores como la acumulación de solutos, tamaño de la célula y

volumen osmótico (Cutler *et al.*, 1977; Turner y Jones, 1980; Morgan, 1984).

Módulo de Elasticidad Volumétrica

Steudle *et al.* (1977) sugieren que uno de los parámetros más importantes en las relaciones hídricas de los tejidos, es el módulo de elasticidad volumétrica (E) referido como:

$$E = v \frac{dp}{dv} \quad (2.3)$$

donde E describe el cambio fraccional en el volumen de respuesta a un cambio de presión y determina la pendiente de las curvas de presión volumen de las células de las plantas, estos mismos autores mencionan que la tasa de incremento de agua durante las contracciones y alargamientos celulares en respuesta a tensiones osmóticas no sólo depende de las propiedades de la membrana, sino también de la elasticidad de la pared celular, ya que la elasticidad mecánica y las propiedades elásticas de las células de las plantas se atribuyen a la estructura de las paredes celulares.

Wilson *et al.* (1979) proponen para calcular el módulo de elasticidad volumétrica (E), tres ecuaciones:

$$E = CRA^0 \left[\text{Tan} \left(\frac{d CRA}{d \Psi_p} \right) \right] \quad (2.4)$$

$$E = \left[\frac{d \frac{1}{\Psi_p}}{dF} \right] \Psi_p \quad (2.5)$$

$$\log \Psi_p = \log E + n \log \left[\frac{CRA - CRA^0}{CRA^0} \right] \quad (2.6)$$

donde: CRA^0 = contenido de agua a $\Psi_p = 0$

E = contenido de agua osmótica

n = pendiente de la relación logarítmica entre

Ψ_p y $\left[\frac{CRA - CRA^0}{CRA^0} \right]$

De estas tres ecuaciones, la última se puede resolver mediante un sistema de ecuaciones simultáneas y para Ψ_p máximo ($CRA = 1.00$).

Steudle *et al.* (1977) mencionan que es necesario tener datos disponibles de los parámetros de relaciones hídricas a nivel celular para hacer una descripción adecuada y completa de las relaciones hídricas de plantas superiores a nivel de tejido y órganos, ya que ésto puede lograrse con el uso de la técnica presión-volumen mediante la cual pueden determinarse algunos parámetros como son el módulo de elasticidad, tiempo de intercambio y los componentes del potencial del agua de los cuales, de alguna manera, afectan las propiedades de contracción o alargamiento de una célula y sus propiedades osmóticas en tejido bajo condiciones de déficit hídrico.

López (1985) encontró que los rendimientos más altos en una colección de materiales de chile ancho, se observan en los materiales de módulo de elasticidad menores debiéndose a un mantenimiento al menos parcial, de la turgencia con la deshidratación progresiva, ya que el módulo de -

elasticidad (E) es directamente proporcional a un cambio de potencial de presión (Ψ_p) en relación a un volumen perdido de agua ($E = v dp/dv$).

Chavira (1986) en un estudio de relaciones hídricas y de elasticidad en frijol, sugiere que la adaptación de las especies a condiciones adversas de humedad del suelo, puede ser explicada, en parte, por el módulo de elasticidad, ya que las especies con módulo de elasticidad menores tienen una mayor resistencia a bajas precipitaciones pluviales. Comenta que estos resultados pueden ser utilizados como criterio para la selección de materiales para mejoramiento genético, sugiriendo que para trabajos futuros será necesario considerar otros factores propios de la planta, que intervienen en su capacidad adaptiva como déficits de humedad ambiental, hábitos de crecimiento radicular y foliar, y comportamiento del cierre de estomas, a fin de tener una evaluación más completa.

Contenido Relativo de Agua

Barrs y Weatherley (1962) definen el contenido relativo de agua por vez primera, como la relación entre la cantidad de agua en el tejido de la hoja al momento del muestreo, en relación a la cantidad de agua presente cuando el tejido está completamente turgente.

Smart y Bingham (1974) describen una técnica para estimar el CRA y proponen un método más rápido que el

propuesto por Barrs y Weatherley para estimación de este parámetro.

Wilson *et al.* (1979) obtuvieron una función exponencial del potencial del agua con respecto al contenido relativo de agua en donde el potencial osmótico y el potencial de presión se estiman con una regresión lineal que, a su juicio, tiene un comportamiento lineal.

Brown y Tanner (1983) compararon los métodos de la bomba de presión de Scholander y el psicrómetro para obtener la función Ψ con respecto a CRA y en ambos fraccionan la curva resultante en un segmento recto y en un curvado.

Jasso (1985) indica que la distribución de valores de potencial de agua en función del contenido relativo de agua, puede obtenerse en alto grado de correlación empleando una función de distribución continua de la siguiente forma:

$$Y = a + b \log \left(\frac{1 - X}{X} \right) \quad 0 \leq Y \leq \infty; \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (2.7)$$

Generalmente los valores de contenido relativo de agua no son menores de 0.5 para que este rango cumpla con los límites de la función señalada arriba, es necesario una transformación:

$$X = \frac{CRA_i - CRA'}{1 - CRA'} \quad (2.8)$$

donde: CRA' = contenido relativo de agua en el que al aplicar un incremento de presión, éste, ya no es reducido -

notablemente. Su valor se determina al obtener la tendencia de CRA y Ψ . La función final queda:

$$Y = a + b \log \left(\frac{1 - CRA_i}{CRA_i - CRA'} \right); \quad CRA' \leq CRA \leq 1.0 \quad (2.9)$$

A partir de esta ecuación se puede derivar una función de potencial osmótico (Ψ_s) con respecto a CRA:

$$\Psi_s = \frac{1}{a' + b' CRA} \quad (2.10)$$

donde: a' y b' = parámetros de regresión entre el recíproco y CRA en el segmento recto (asintótico al eje de CRA), que se puede obtener fácilmente con un sistema de ecuaciones simultáneas de primer grado.

Los valores del potencial de presión (Ψ_p) se obtienen por diferencia, y la gráfica resultante se conoce como diagrama de Hoffler.

METODOLOGIAS Y PARAMETROS UTILIZADOS PARA LA SELECCION DE GENOTIPOS TOLERANTES A SEQUIA

Hasta la fecha se han utilizado metodologías y parámetros de selección para tolerancia a sequía, tanto bajo condiciones de laboratorio como de invernadero y campo.

Kuruvadi (1980) menciona varios métodos para clasificar variedades por su grado de resistencia a sequía: evaluación de genotipos para rendimiento en el campo bajo temporal; medida de la tasa de fotosíntesis, densidad, tamaño

y comportamiento de los estomas; agua retenida en las hoja cortadas, medición de la temperatura de la hoja; potencial hídrico de los tejidos de la planta; porcentaje de germinación de semillas en diferentes presiones osmóticas con manitol o polietilén glicol; evaluación por contenido de prolina, betaina, ácido abscísico, agua fisiológica, proteínas, azúcares; actividad de enzimas; estudio del potencial y modelo del sistema radicular; enrollamiento de la hoja; área foliar y evaluación de factor de recuperación después de castigos de agua en diferentes etapas de la planta.

Métodos de Campo

Muñoz (1978) comenta que el sistema de riego - sequía trata de valorar la capacidad de los genotipos para reducir en menor grado su producción al pasar de la condición de humedad favorable (riego) a la condición desfavorable (sequía) y utilizan el valor de esta capacidad como un índice de resistencia a sequía. En otras palabras, se trata de evaluar las variedades en base a la interacción del genotipo con las variaciones de humedad.

También comenta que los dos niveles de humedad incluidos en el método, implican que la respuesta sea lineal lo cual es útil en una primera aproximación, siendo necesario explorar las respuestas bajo tres niveles de humedad.

Con el fin de determinar la técnica más eficiente para detectar dicha interacción, en 1967 se instalaron tre

experimentos, en ellos se probaron tres métodos de aplicación del agua de riego, tendientes a diferenciar la condición de humedad favorable de la condición de sequía, según se ilustra en la Figura 2.4. Bajo esos tres métodos, se ensayaron 20 variedades utilizando cuatro repeticiones. El tratamiento de sequía consistió en suspender el riego de los 50 a los 90 días después de la siembra.

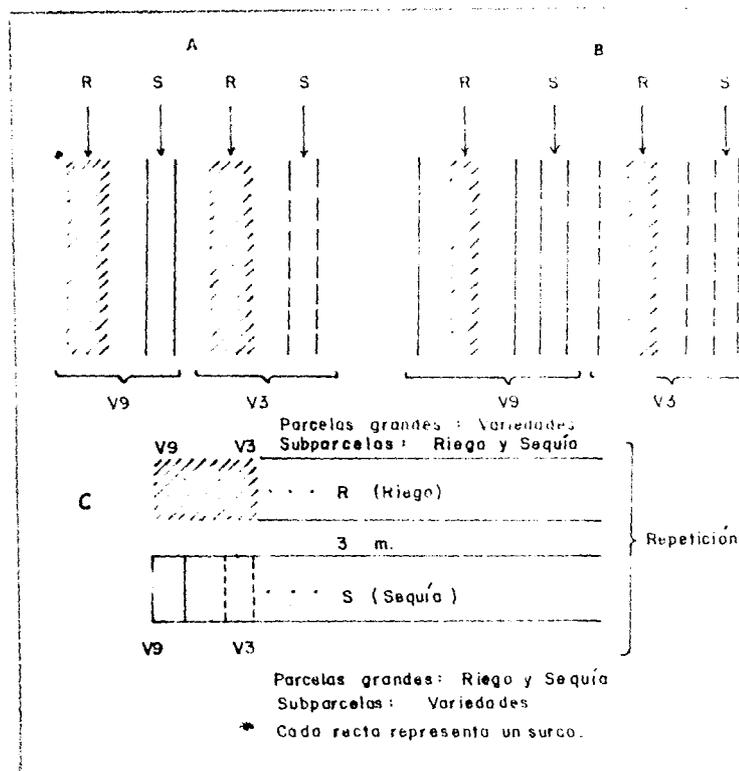


Figura 2.4. Tres métodos de aplicar el riego para diferenciar la condición de humedad favorable de la condición de sequía.

Con el método A no se detectó la interacción, aún cuando hubo diferencias entre la condición de sequía y la de riego. Se puede observar que por la cercanía, de las parcelas de riego, se infiltraba cierta humedad a los de sequía en los métodos B y C se diferenciaron mejor los

tratamientos de humedad y se detectó la interacción en ambos casos; sin embargo, el método B requiere un área no útil muy grande, mucha semilla de las variedades, riegos más frecuentes, y un manejo más difícil. En el método C, el diseño está organizado para obtener mayor precisión en las variedades y en la interacción que son los factores que realmente interesan, ya que los tratamientos riego y sequía de antemano se sabe que son diferentes. De hecho, este método se venía ya utilizando, sin embargo, estos resultados suministran una base experimental que imparte mayor confianza en su uso.

Clarke *et al.* (1984) clasificó genotipos de trigo en susceptibles a sequía, y resistentes a sequía, en base al índice de susceptibilidad a sequía propuesto por Fischer y Mauren, (1978); menciona que el análisis de crecimiento es un procedimiento intensivo que es útil para identificar características, las cuales están fuertemente relacionadas con resistencia a sequía.

García (1985) concluye que la metodología riego - sequía para simular déficit hídrico bajo condiciones de temporal, resulta experimentalmente eficiente para identificar ciertas características de tolerancia a sequía en genotipos de maíz. También obtuvo relaciones funcionales tales como: a) grano - ET; b) materia seca - ET; c) grano - tensión media; d) grano - materia seca.

Métodos de Laboratorio e Invernadero.

Tolerancia a la Presión Osmótica. En estudios sobre el efecto de sequía en germinación o en crecimiento de plántulas - en medio líquido, el potencial hídrico puede ser simulado - al adicionar sustratos osmóticos al agua. Así el suelo se descarta para eliminar las complicaciones inherentes al medio suelo-agua, con ello se elimina el componente mátrico, y el potencial hídrico total equivale al potencial osmótico de la solución.

De los sustratos osmóticos más utilizados destacan el polietilen glicol y el manitol. El polietilen glicol es un compuesto fisiológicamente inerte, no iónico, y que no provoca efectos secundarios en el metabolismo de las plantas (Viqueira *et al.*, 1981).

El polietilen glicol 6000 es un polímero de óxido de etileno con la fórmula generalizada $\text{HOCH}_2(\text{CH}_2\text{OCH})_n\text{CH}_2\text{OH}$, donde n = número promedio de grupos oxietileno (Steuter *et al.*, 1981). Este polímero está caracterizado por una baja reactividad química, una solubilidad relativamente alta y un peso molecular promedio 6000 a 7500 (Zur, 1966).

Michel (1983) reporta valores experimentales para Y_S causados por soluciones de polietilen glicol 6000 cuyos ajustes fueron ± 0.02 MPa diferente de los predichos por la ecuación generada empíricamente:

$$Y_S = 1.29 (\text{PEG})^2 T - 140 (\text{PEG})^2 - 4 (\text{PEG})$$

donde: PEG = kg de PEG ℓ^{-1} H₂O

$T = 25^{\circ}\text{C}$ (temperatura de laboratorio)

$Y_S = \text{bars}$

Con un rango de concentración de 0 a 0.8 gr de PEG por gramo de agua y con un rango de temperatura de 5 a 40 - grados centígrados, esta ecuación puede tener un error de 5 por ciento (Michel ,1983). Se ha encontrado que el Y_S de soluciones de PEG varía cuadráticamente con la concentra - ción y linealmente con la temperatura (Michel y Kaufmann, - 1973).

Parmar y Moore (1966) mencionan que cuando utiliza - ron soluciones de polietilen glicol 6000 para simular condi - ciones de sequía en semilla de maíz, pudieron predecir dife - rencias en su tolerancia a la sequía en relación a emergen - cia de lotes de semillas en el campo.

Williams *et al.* (1967) compararon la resistencia a sequía de líneas endocrinas o híbridos mediante: a) el por - centaje de plántulas que se recuperaron después de una expo - sición de seis horas a 52 grados centígrados (tolerancia al calor); b) porcentaje de germinación de semillas expuestas a una solución de manitol de -1.5 MPa; c) porcentaje de re - cuperación de plántulas regadas 14 días después de haber - llegado al marchitamiento permanente.

Los resultados obtenidos mediante cada una de estas técnicas fueron probados mediante un análisis de correla - ción con evaluaciones de campo basadas en la relación entre

el rendimiento de grano bajo humedad limitante y el rendimiento sin restricción de agua (rendimiento relativo). Los resultados muestran que la información proveniente de estas tres técnicas está correlacionada con los datos de campo y por lo tanto, cualquiera de ellas es útil en un programa de mejoramiento genético.

Steuter *et al.* (1981) trabajaron cuatro diferentes tamaños de moléculas de polietilen glicol, encontrando que el potencial osmótico de las soluciones varía en función del tamaño de molécula de polietilen glicol a utilizar.

Gergely *et al.* (1980) concluyeron que el stress de agua inducido por el polietilen glicol fue similar al stress de agua en el suelo.

Bousslama y Schapaugh (1984) compararon tres técnicas para la selección de genotipos de soya tolerantes a sequía: a) germinación de semillas en polietilen glicol a -0.6 MPa de presión osmótica; b) plántulas sujetas a una presión osmótica de -0.6 MPa simulada con polietilen glicol en soluciones hidropónicas por 14 días; c) prueba de tolerancia al calor, basada en la termostabilidad de la membrana celular.

Concluyeron que de las tres técnicas evaluadas, el de plántulas sujetas a una presión osmótica de -0.6 MPa en solución hidropónica por 14 días fue la técnica más confiable para la selección de genotipos de soya tolerantes a sequía.

Espinoza y Kuruvadi (1985) evaluaron 12 colecciones de zacate gigante (*Leptochloa dubia* H.B.K., Nes) por su grado de resistencia a sequía en manitol, manejaron seis niveles de presión osmótica (0, -0.3, -0.6, -1.2 y 1.5 MPa). Determinaron que las colecciones Durango 39, Chihuahua 30, Chihuahua 188 y Chihuahua 120 produjeron mayor porcentaje de germinación en alta presión osmótica y se pueden considerar como resistentes a sequía, mientras que las colecciones Narro y Chihuahua 22, Jalisco 64, San Luis Potosí 190 y Coahuila produjeron porcentajes de germinación intermedio y se les consideró como moderadamente resistentes; los genotipos Zacatecas S, Zacatecas 7 y Aguascalientes produjeron menor porcentaje de germinación, mostrando ser susceptibles a sequía.

Otras Técnicas. Kilen y Andrew (1969) compararon tres métodos de medir resistencia a sequía en maíz: a) plántulas expuestas a sequía atmosférica y al calor; b) prueba de estabilidad de clorofila y del tejido de la hoja; c) una prueba de inhibición de conductancia de hojas cortadas. En este estudio se relacionaron parámetros de campo tales como: altura de planta, área foliar, número de hojas por planta, número de estomas, número de haces del sistema vascular y el quemado de la hoja en el campo.

Los resultados fueron positivamente y altamente correlacionados entre las tres pruebas y cada prueba con el quemado de la hoja en el campo. La altura de planta estuvo

negativa y significativamente correlacionada con los resultados de las pruebas y con el quemado de la hoja en el campo.

Clarke y Mc Caig (1982) evaluaron tres técnicas para resistencia a sequía en trigo: a) resistencia a la difusión de la hoja; b) temperatura de la hoja; c) tasa de pérdida de agua de hojas cortadas. Concluyeron que de las tres técnicas evaluadas, la tasa de pérdida de agua de hojas cortadas parece ser la técnica más prometedora.

O'Toole *et al.* (1984) en un estudio en el cultivo de arroz compararon ocho métodos para medir el stress de agua del cultivo, siendo los siguientes métodos: potencial de agua en la hoja (Ψ); resistencia estomatal (R_s); tasa de transpiración (T); tasa de fotosíntesis neta (P_n); temperatura del cultivo (T_c); temperatura del cultivo menos temperatura del aire ($T_c - T_a$); índice de stress de agua del cultivo (CWSI) y el enrollamiento visual de la hoja (LRS).

Estos métodos fueron comparados por precisión, sensibilidad y tiempo de muestreo. La precisión fue estimada por comparación del Ψ hoja y por la interacción entre el nivel de stress de agua y la hora del día. Todos los métodos, excepto la (P_n) estuvieron significativamente correlacionados con el Ψ hoja a un nivel del uno por ciento. Sin embargo, T_c , ($T_c - T_a$) y CWSI mostraron menor interacción entre el nivel de stress de agua y la hora del día, cuando la varianza total fue particionada en sus componentes relativos:

nivel de stress de agua, hora del día y la interacción entre el nivel de stress de agua y la hora del día.

El LRS fue el método más rápido mientras que la T_c ($T_c - T_a$) y CWSI fueron tres veces más rápidos que la técnica de intercambio de gas y alrededor de 2.5 veces más rápidos que el Ψ hoja. Se encontró que el CWSI estuvo altamente correlacionado con la P_n y representa un avance significativo en la medición del stress de agua del cultivo.

EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA

Uno de los aspectos más importantes en la productividad de los cultivos, es la eficiencia en el uso del agua que se considera como la relación que existe entre la tasa de entrada de CO_2 a la planta y la tasa de agua transpirada por el cultivo (Hsiao y Acevedo, 1974; Fischer y Turner, 1978).

Sin embargo, hay bastante información sobre la eficiencia en el uso del agua que está dada en términos de materia seca acumulada por agua transpirada (Hsiao y Acevedo 1974; Begg y Turner, 1976; Fischer y Turner, 1978). El cálculo de la eficiencia en el uso del agua, en términos de materia seca acumulada, se basa en el contenido de carbono existente en la materia seca (0.61 a 0.68 gr MS/gr CO_2).

La eficiencia en el uso del agua basada en materia seca, sufre de ciertas complicaciones, una de ellas es que el agua en el campo se pierde por transpiración y

evaporación del suelo, siendo difícil separar estas pérdidas, otra causa es que la materia seca de las raíces, frecuentemente no se toma en cuenta o se utiliza solamente la materia seca comercial (Fischer y Turner, 1978)

Las plantas utilizan el agua en forma diferente, por lo que existen plantas con diferente capacidad, para ser eficientes en uso de agua. Analizando lo anterior, se conoce que la resistencia de la epidermis al paso del agua o CO_2 afecta menos el paso de CO_2 , lo cual, explica que puede existir una ganancia en la eficiencia en el uso del agua, cuando existe un déficit de agua. Las plantas C_4 generalmente presentan baja resistencia en el mesofilo y un punto bajo de compensación de CO_2 , al compararse con plantas que presentan el ciclo de Calvin-Benson en la fotosíntesis (C_3), también las plantas C_4 , tienen una resistencia estomatal mayor que las C_3 en ambientes similares, esto puede ser la razón de que las plantas C_4 sean más eficientes en el uso del agua (Hsiao y Acevedo, 1974).

Rodríguez (1980), sugirió los conceptos de tasa del uso del agua (TUA) y la tasa de uso del nutriente (TUN) como medidas de la eficiencia del agua y del fertilizante respectivamente. Estos conceptos fueron desarrollados por analogía a la tasa de asimilación neta (TAN) y a la tasa de crecimiento relativo que son estimadores de la eficiencia fotosintética y del crecimiento, respectivamente.

Jasso y Rojas (1982) mencionaron que una opción interesante para incrementar la eficiencia en el uso del agua consiste en seleccionar genotipos con mayor acumulación de materia seca por unidad de agua utilizada o genotipos con altas tasas de asimilación de CO_2 los cuales con frecuencia tienen una baja fotorespiración.

Johnson *et al.* (1984) en un estudio sobre ajuste osmótico, acumulación de solutos en dos genotipos de trigo difiriendo en resistencia a sequía, concluyeron que la selección de factores tales como la eficiencia en el uso del agua, elasticidad del tejido, y ajuste osmótico para impartir resistencia a sequía en trigo, pueden ser posibles.

Muñoz *et al.* (1983), en un estudio sobre transpiración, fotosíntesis, eficiencia en uso de agua y potencial hídrico en maíces resistentes a sequía y a heladas, concluyen que las variedades seleccionadas bajo sequía mostraron mayor eficiencia en el uso del agua, en la gama de -3.5 a -9 barios. Debido a que la resistencia total a la difusión del CO_2 es mayor que la resistencia difusiva total del vapor de agua, el cierre estomático produce una reducción mayor de la transpiración que de la fotosíntesis; este mecanismo operó de manera más pronunciada en las variedades obtenidas bajo sequía por un mayor cierre estomático, redundando en una mayor eficiencia en el uso del agua. Además, los bajos valores observados para las resistencias mesofílicas en la mayor parte de la gama de potenciales hídricos referida, -

contribuyeron también a esa mayor eficiencia en el uso del agua.

MATERIALES Y METODOS

En el presente trabajo de investigación se evaluaron tres metodologías para la selección de genotipos de maíz tolerantes a sequía; una metodología de campo y dos de laboratorio.

En ambos experimentos se evaluaron seis líneas de maíz proporcionadas por el Instituto Mexicano del Maíz de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) las cuales fueron las siguientes:

- | | |
|--------------------------|-----------|
| 1. AN-43 | (Línea A) |
| 2. SSE-18-19 | (Línea B) |
| 3. AN-20 | (Línea C) |
| 4. Nepoprec ₁ | (Línea D) |
| 5. Nepoprec ₂ | (Línea E) |
| 6. B ₃ | (Línea F) |

EXPERIMENTO DE CAMPO

Localización y Características del Terreno

El experimento se estableció en terrenos de la (UAAAN), cuyas coordenadas geográficas son 25°23' latitud norte. 101°00' longitud oeste y 1743 metros sobre el nivel

del mar. El clima se designa BWhw" (e) de acuerdo al sistema de clasificación de W. Koppen, que corresponde a muy árido, semi-cálido, con precipitación en verano e invierno seco y extremo.

La temperatura media anual es de 17.1 grados centígrados, con fluctuación en la media mensual de 11.6 grados centígrados hasta 21.7 grados centígrados; los meses secos son: enero, febrero, marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. La evaporación media anual es de 1966 milímetros (tanque evaporímetro tipo "A").

El suelo del sitio experimental cuyas características físico-químicas, son mostradas en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Propiedades físicas y químicas del suelo en el sitio experimental.

	Profundidades (cm)			
	0 - 30	30 - 60	60 - 90	90 - 120
Materia orgánica (%)	5.06	4.26	3.76	2.71
Nitrógeno total (%)	0.253	0.213	0.188	0.135
Fósforo aprovechable (kg/ha)	34.65	22.5	23.4	10.35
Potasio intercambiable (kg/ha)	936.0	436.5	144.0	144.0
Carbonatos totales (%)	56.95	78.4	93.35	96.6
Potencial de hidrógeno (pH)	8.03	8.16	7.97	7.97
C.E. milimhos/cm ³	1.35	0.60	0.62	0.64
Arena (%)	17.6	27.6	21.6	15.6
Limo (%)	30.0	22.0	24.0	18.0
Arcilla (%)	52.4	50.4	54.4	66.4
Clase textural	Arcilloso	Arcilloso	Arcilloso	Arcilloso
Densidad aparente (gr/cm ³)	1.083	1.048	0.921	0.989

El primer estrato (0-30 cm) tiene los contenidos más altos de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio, disminuyendo conforme aumenta la profundidad del suelo. El potencial de hidrógeno (pH) en promedio para los diferentes estratos es de 8.03, considerándose un suelo medianamente alcalino. De acuerdo a la conductividad eléctrica (CE) se considera un suelo no salino.

En la Figura 3.1 se muestra la curva característica de retención de humedad del suelo.

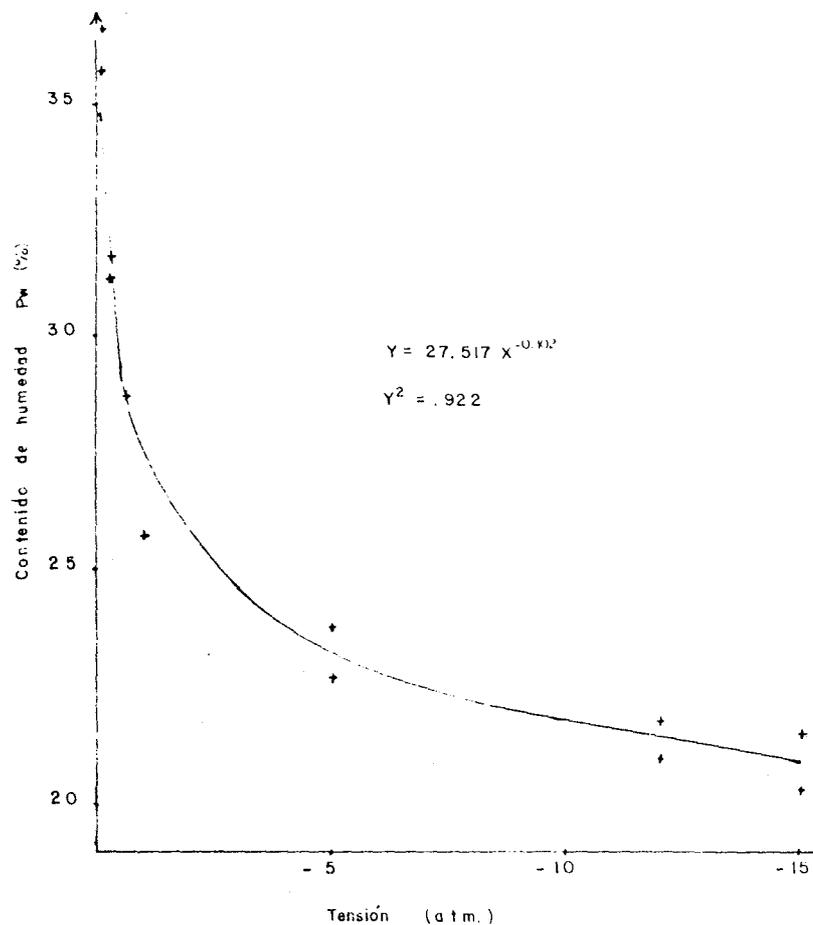


Figura 3.1. Curva característica de retención de humedad del sitio experimental. Estrato (0-30 cm).

Descripción de Tratamientos en Estudio

En este experimento se estudiaron dos factores: nivel de humedad del suelo (factor A), y líneas de maíz (factor B). El factor A lo formaron tres subniveles (-3, -8, -15 bars). El factor B estuvo comprendido por seis subniveles (líneas de maíz A, B, C, D, E y F), siendo un total de 18 tratamientos en estudio cuya distribución y arreglo en el campo se muestra en la Figura 1A del apéndice.

El diseño experimental utilizado fue parcelas divididas en bloques al azar con tres repeticiones por tratamiento, asignándose a las parcelas principales las tensiones de humedad y a las sub-parcelas las líneas de maíz. Las dimensiones de las parcelas principales fueron de 14 metros de largo y 5.6 metros de ancho. Dentro de cada parcela grande se formaron seis subparcelas, cada subparcela la formaron dos surcos de 21 plantas cada uno.

Manejo del Experimento

La siembra se efectuó el 29 de abril de 1987, sembrándose en forma manual, depositándose dos semillas por golpe, con una separación entre plantas de 25 centímetros y una separación entre hileras de 80 centímetros, dando una densidad de población de 50 000 plantas por hectárea.

La dosis de fertilización fue la de 160-80-0 recomendada para esta región, aplicándose la mitad del nitrógeno al momento de la siembra y todo el fósforo. La otra

mitad del nitrógeno se aplicó en los 41 días después de la siembra.

Para la aplicación de los riegos se utilizaron sifones de aluminio de dos pulgadas de diámetro exterior (diámetro interior 4.7 centímetros) los cuales fueron aforados para calcular el volumen de agua aplicado a cada parcela, siendo la ecuación de calibración la siguiente:

$$Q = .588 H^{.427} \quad (3.1)$$

donde: Q = gasto en LPS

H = carga hidráulica de operación en centímetros

El momento de aplicación de los riegos se determinó en base a las tensiones de humedad pre-establecidas utilizando la curva de retención de humedad para el estrato de 0-30 centímetros. En cada riego se aplicó una lámina para humedecer una profundidad de 90 centímetros.

Las láminas aplicadas a los diferentes tratamientos de humedad se muestran en el Cuadro 3.2.

Con el fin de que los tratamientos de humedad no se homogeneizaran debido a las altas precipitaciones que se presentaron durante el desarrollo del cultivo, se cubrieron los tratamientos regados a -15 bars con una película de polietileno transparente calibre 6000, permitiendo la libre entrada del aire por las partes laterales, dichos tratamientos duraron cubiertos del 20 de julio al 10 de agosto de 1987.

Cuadro 3.2. Riegos y láminas aplicadas a los diferentes tratamientos de humedad (-3, -8 y -15 bars).

Riegos	Factor A (Niveles de humedad)					
	T ₁ (-3 bars)		T ₂ (-8 bars)		T ₃ (-15 bars)	
	Lámina (cm)	Fecha	Lámina (cm)	Fecha	Lámina (cm)	Fecha
Presiembra	12.17	24/4/87	12.17	24/4/87	12.17	24/4/87
1	8.21	22/5/87	13.43	3/7/87	14.17	3/7/87
2	6.72	19/6/87	8.71	20/8/87		
3	11.29	3/7/87				
4	6.1	12/8/87				
Total	44.49		34.31		26.34	

Los datos de precipitación mensual durante el desarrollo del cultivo se presentan en la Figura 3.2.

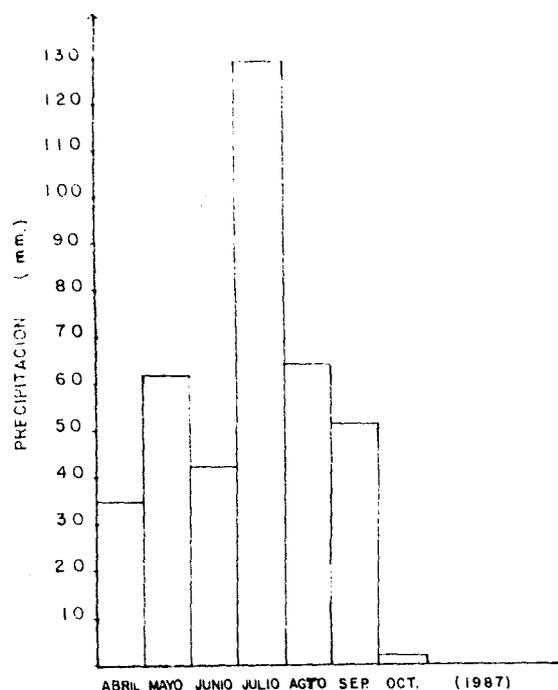


Figura 3.2. Precipitación mensual durante el desarrollo del cultivo. (Estación: Buenavista, Coah.)

Durante el desarrollo del cultivo se efectuaron aplicaciones de insecticida* para el control del gusano cogollero,

*Cavin 20

aplicándose dos kilogramos del mismo en 200 litros de agua/hectárea. Las aplicaciones se efectuaron los días 21 de mayo, 19 de junio, 10 de julio de 1987.

Se efectuó el aclareo cuando hubo seguridad de que las plántulas se estaban desarrollando normalmente, dejando una separación entre plantas de 25 centímetros. Dicha labor se realizó el 3 de junio de 1987.

También se mantuvo libre de malezas el cultivo durante los primeros 40 días después de la siembra, efectuándose el último deshierbe el 12 de agosto de 1987.

Variables de Respuesta

Índice de Área Foliar. El índice de área foliar (IAF) se determinó cuando todas las líneas de maíz se encontraban en estado de floración, utilizándose la fórmula propuesta por Watson (1952). En cada subparcela se seleccionaron cuatro plantas en forma aleatoria, a las cuales se les determinó el área de las hojas por medio de la fórmula propuesta por Montgomery (1911). $AF = 0.75 LW$, donde L y W son el largo y ancho máximo de la hoja. La suma de todas las áreas de las hojas proporcionó el área foliar por planta. El IAF se calculó de la siguiente forma:

$$IAF = \frac{\bar{af}}{at} \quad (3.2)$$

donde: IAF = índice de área foliar, cm^2/cm^2

\bar{af} = área foliar media para las cuatro plantas -

muestreadas, cm^2

at = área del terreno que ocupa cada planta, cm^2

Altura Máxima de Planta. La altura máxima de planta (AMP) - también se midió cuando todas las líneas estaban en flora - ción, midiéndose la altura comprendida entre la base del ta - llo y la base de la hoja bandera, efectuándose dicha medi - ción en 10 plantas de cada sub-unidad.

Días a Floración Masculina y Femenina. La floración masculi - na y femenina se consideró cuando el 50 por ciento de las plantas de cada sub-unidad presentaban anteras abiertas y - estigmas receptivos respectivamente.

Eficiencia de Area Foliar. La eficiencia de área foliar - (EAF) se determinó con el área foliar por planta en antesis usando la fórmula propuesta por Wong (1979)

$$EAF = \frac{Rg}{Af} \quad (3.3)$$

donde: EAF = eficiencia de área foliar, kg/m^2

Rg = rendimiento de grano, kg

Af = área foliar en antesis, m^2

Densidad Estomática. Se efectuó un conteo de estomas de las hojas bandera de tres plantas seleccionadas al azar en cada sub-unidad, sacando una huella (imprimiendo huellas del haz) utilizando una solución plástica transparente (esmalte para uñas) tomando de aquí dos campos visuales al azar y contando

todos los estomas presentes, vistos al microscopio.

Rendimiento de Grano. Se cosecharon seis plantas de cada sub-unidad, una vez desgranadas las mazorcas se pesó el grano y se le determinó el contenido de humedad al momento de la cosecha, para lo cual se pesaron 250 gr y se determinó el contenido de humedad con un medidor de humedad de grano (marca Steinlite, modelo SS 250), utilizándose la siguiente fórmula para ajustar el peso del grano al contenido de humedad deseado:

$$P_f = P_i \left(\frac{100 - CH_i}{100 - CH_f} \right) \quad (3.4)$$

donde: P_f = peso del grano final

P_i = peso del grano inicial

CH_i = contenido de humedad inicial

CH_f = contenido de humedad final

Para obtener el rendimiento de grano en toneladas por hectárea al 15.5 por ciento de humedad, se multiplicó el peso seco ajustado por un factor de conversión, a saber:

$$F_c = \frac{10\,000 \text{ m}^2 (1 \text{ ton})}{(\text{apu}) (.845) (100 \text{ kg}) (1 \text{ ha})} \quad (3.5)$$

donde: F_c = factor para convertir a toneladas por hectárea de grano al 15.5 por ciento de humedad

apu = área de la parcela útil (distancia entre surcos x distancia entre plantas x número de plantas cosechadas), m^2

0.845 = constante para obtener el rendimiento en ki
logramos por hectárea al 15.5 por ciento de
humedad

Rendimiento Biológico. El rendimiento biológico se obtuvo -
al pesar la materia seca del tallo, hojas, espiga y mazorca
de un promedio de seis plantas de cada subunidad experimen-
tal después de someterlas a secado en la estufa, por un pe-
ríodo de 72 horas a 70 grados centígrados.

Índice de Cosecha. El índice de cosecha se estimó de acuer-
do a la fórmula propuesta por Donald y Hamblin (1976) como
una relación entre el rendimiento económico (rendimiento de
grano) y el rendimiento biológico (peso seco total) prome-
dio por planta

$$Ic = \frac{\bar{r}_g}{\bar{p}_{st}} \quad (3.6)$$

donde: \bar{r}_g = rendimiento medio de grano por planta, kg
 \bar{p}_{st} = peso seco total medio por planta, kg

Índices de Susceptibilidad a Sequía. Se estimaron dos índi-
ces de susceptibilidad a sequía, uno en base a rendimiento
de grano al 15.5 por ciento de humedad, y otro en base a -
producción de materia seca total o rendimiento biológico, -
de acuerdo a Fischer y Maurer (1978).

$$S = (1 - Y_s/Y_p)/D; D = \bar{Y}_s/\bar{Y}_p \quad (3.7)$$

donde: S = índice de susceptibilidad a sequía

Y_s = rendimiento bajo sequía, kg

Y_p = rendimiento sin sequía, kg

D = intensidad de sequía

\bar{Y}_s = rendimiento medio de todos los genotipos en estudio bajo sequía, kg

\bar{Y}_p = rendimiento medio de todos los genotipos en estudio sin sequía, kg

Para el cálculo de estos índices de susceptibilidad a sequía se consideró el Y_s como el rendimiento de cada uno de los genotipos de maíz bajo una tensión de humedad del suelo de -15 bars, y el Y_p al rendimiento obtenido bajo una tensión de -3 bars. Es decir, los índices se calcularon de los dos niveles extremos de tensión de humedad del suelo (-3 y -15 bars).

Estos índices se analizaron como un diseño de bloques al azar con tres repeticiones por tratamiento.

Metodologías de Laboratorio

Las dos metodologías de laboratorio evaluadas fueron

- a) Germinación de semillas en polietilen glicol 600 (PEG 6000) a presiones osmóticas de 0 y -2.0 MPa.
- b) Germinación de embriones de semillas en manitol y medio nutritivo a presiones osmóticas de -.35 y -1.0 MPa.

Germinación de Semillas en Polietilen Glicol 6000 (PEG 6000) a presiones osmóticas de 0 y -2.0 MPa. Las seis líneas de maíz evaluadas bajo condiciones de campo se evaluaron también bajo condiciones de laboratorio, bajo dos niveles de presión osmótica (0 y -2.0 MPa), generadas por soluciones de polietilen glicol 6000.

Se utilizaron cajas petri de nueve centímetros de diámetro y dos centímetros de altura; en el fondo de cada caja petri se colocó un disco de algodón y se procedió a esterilizar las cajas petri en autoclave¹. Una vez esterilizadas las cajas petri, se procedió a vaciar las soluciones osmóticas de 0 y -2.0 MPa, preparándose de acuerdo a la ecuación propuesta por Michel (1983), la cual es la siguiente:

$$Y_s = .129(\text{PEG})^2 T - 14 (\text{PEG})^2 - 0.4 (\text{PEG}) \quad (3.9)$$

donde: Y_s = potencial osmótico, MPa

PEG = kg/PEG/litro de H₂O destilada

T = temperatura en grados centígrados

Después de efectuado lo anterior, se colocó un disco de papel filtro del # 1 en cada caja y sobre éste se depositaron 10 semillas formando cada caja petri una unidad experimental.

La germinación se realizó en un gabinete germinador a una temperatura de 25 grados centígrados, por un tiempo de 10 días.

¹ Modelo AF 25, marca Chromalox.

El criterio para considerar germinada una semilla - fue que la radícula alcanzara por lo menos cinco milímetros de longitud.

Con estos datos se calculó un índice de stress en fase de germinación, propuesto por Bouzlama y Schapaugh (1984), el cual se calculó de la siguiente manera:

$$ISG = \frac{IPs}{IPO} \times 100 \quad (3.10)$$

donde: ISG = índice de stress en germinación

IPs = índice de prontitud bajo condiciones de stress (-2.0 MPa)

IPO = índice de prontitud bajo condiciones óptimas (0.0 MPa)

$$IP = nd_4 (1.00) + nd_6 (0.75) + nd_8 (0.50) + nd_{10} (0.25) \quad (3.11)$$

donde: IP = índice de prontitud

$nd_{4,6,8,10}$ = porcentaje de semillas germinadas a cuatro, seis, ocho y 10 días después de iniciada la prueba.

El ISG y el porcentaje de germinación total fueron analizados como diseño completamente al azar con tres repeticiones por tratamiento.

Antes de utilizarse el PEG 6000 para preparar las soluciones osmóticas, se le efectuó un análisis con el espectrofotómetro de absorción atómica¹.

Modelo 2390 Perkin Elmer

para conocer si contenía elementos pesados tales como zinc, cobre y fierro, que pudieran inducir toxicidad a las semillas.

Germinación de Embriones de Semillas en Manitol y Medio Nutritivo a Presiones Osmóticas de -0.35 y -1.0 MPa. En este experimento se manejaron dos niveles de presión osmótica (-0.35 y -1.0 MPa), utilizando soluciones de manitol.

La presión osmótica de -0.35 MPa la dió en forma natural el medio nutritivo (medio nutritivo M.S.) y la presión osmótica de -1.0 MPa, se simuló con el medio nutritivo y el manitol, de acuerdo a la ecuación de Vant'Hoff, la cual es la siguiente:

$$\pi = \frac{RT}{V} N_s \quad (3.1)$$

donde: π = presión osmótica, MPa

R = constante 0.0082 , litros-MPa/mol-grados

V = un litro

N_s = número de moles de soluto.

La forma en que se preparó el medio nutritivo M.S. se puede apreciar en los Cuadros 3.3 y 3.4.

La presión osmótica de -1.0 MPa se seleccionó después de haber efectuado una prueba preliminar y a esta presión fue donde se encontraron diferencias significativas entre las líneas de maíz evaluadas.

Cuadro 3.3. Soluciones utilizadas para preparar el medio nutritivo Murashige y Skoog (M.S)

Soluciones	por litro de solución madre
Solución A (100 X)	
CaCl ₂ · 2H ₂ O	44 gr
Solución B (10 X)	
NH ₄ NO ₃	16.50 gr
KNO ₃	19.00 gr
Solución C (100 X)	
KI	83.00 mg
CaCl ₂ · 6H ₂ O	2.50 mg
Solución D (100 X)	
KH ₂ PO ₄	17 gr
H ₃ BO ₃	0.62 gr
Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	25 mg
Solución E (100 X)	
MgSO ₄ · 7H ₂ O	37.00 gr
MnSO ₄ · 4H ₂ O	1.70 gr
CuSO ₄ · 5H ₂ O	2.50 gr
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0.86 gr
Solución F (200 X)	
FeSO ₄ · 7 H ₂ O	5.57 gr
Na ₂ EDTA	7.45 gr

Una vez preparado el medio nutritivo de acuerdo a los Cuadros 3.3 y 3.4, se le tomó la conductividad eléctrica y, en base a esto, se calculó la presión osmótica del medio nutritivo la cual fue de -0.35 MPa. La presión osmótica de -1.0 MPa, como ya se mencionó, se obtuvo con el medio nutritivo y el manitol, de acuerdo a la ecuación de Van't Hoff.

Después de haber preparado las soluciones osmóticas se procedió a sacar los embriones de las diferentes líneas de maíz, para facilitar tal labor se pusieron a remojar las semillas durante 24 horas en agua destilada.

Cuadro 3.4. Volumen de las diferentes soluciones para preparar un litro de medio nutritivo M.S.

Soluciones	por litro de medio	(M.S.)
Solución A	10.0	ml
Solución B	100.0	ml
Solución C	10.0	ml
Solución D	10.0	ml
Solución E	10.0	ml
Solución F	5.0	ml
Glicina	2.0	ml
Meso-inositol	10.0	ml
Ac. nicotínico	0.5	ml
Piridoxina - HCl	0.5	ml
Sacarosa	30	gr
Tiamina	0.1	ml
pH	5.8	
Agar	7.5	gr

Se procedió a vaciar las soluciones osmóticas en tubos de vidrio de fondo plano de dos centímetros de diámetro y 9.5 centímetros de altura, vaciándose 15 mililitros de solución en cada tubo. En seguida se procedió a desinfectar los embriones en una solución de hipoclorito de calcio al cinco por ciento durante 10 minutos, procediéndose a efectuar la siembra de los embriones bajo una campana de flujo laminar¹.

Al terminar la siembra de los embriones, los tubos se taparon herméticamente con un papel de aluminio fijado con una liga y se llevaron a un cuarto de incubación, a una temperatura de 25 grados centígrados, por un tiempo de 10 días. Al término de esta prueba, se efectuaron las siguientes mediciones:

- a) Porcentaje de germinación total
- b) Longitud de radícula
- c) Longitud de tallo
- d) Peso seco de radícula
- e) Peso seco de tallo
- f) Materia seca total

Los pesos secos de radícula y tallo se obtuvieron al someter las muestras a secado en una estufa a 70 grados centígrados por 48 horas.

Además de estos parámetros se calcularon los siguientes índices de stress:

- a) Índice de stress de longitud de radícula (ISLR)
- b) Índice de stress de longitud de tallo (ISLT)
- c) Índice de stress de materia seca (ISMSR) de radícula
- d) Índice de stress de materia seca de tallo (ISMST)
- e) Índice de stress de materia seca total (ISMSTo).

Estos índices se estimaron en forma similar a los índices estimados por Bouslama y Schapough (1984) de la forma

siguiente:

$$IS(x) = \frac{x_s}{x_r} \times 100 \quad (3.1)$$

donde: IS = índice de stress

(x) = cualquier variable de plántula medida (longitud de tallo, longitud radícula, peso seco tallo, etc.)

x_s = cualquier variable de plántula medida bajo una presión osmótica de -1.0 MPa

x_r = cualquier variable de plántula medida bajo una presión osmótica de -0.35 MPa.

Los índices estimados con las metodologías de laboratorio se analizaron como un diseño completamente al azar con tres repeticiones por tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSION

EXPERIMENTO DE CAMPO

VARIABLES DE RESPUESTA

Los datos de las variables índice de área foliar (IAF), altura máxima de planta (AMP), días a floración masculina y femenina (DFM y DFF), eficiencia del área foliar (EAF), densidad estomática (DE), rendimiento de grano (RG), rendimiento biológico (RB), e índice de cosecha (IC), se muestran en los Cuadros 1A, 2A, 3A, 4A, 5A, 6A, 7A, 8A y 9A del apéndice. Todos estos resultados se analizaron como un diseño de parcelas divididas en bloques al azar y los resultados de los análisis de varianza se muestran en el Cuadro 4.1. En este cuadro se puede observar en cuanto al factor A (niveles de humedad: -3, -8 y -15 bars), que se encontró diferencia altamente significativa para las variables IAF y RB, diferencia significativa para las variables AMP, EAF, RG e IC, y no significancia para las variables DFM, DFF y DE, lo cual indica que la densidad estomática y los días a floración masculina y femenina no fueron afectados por los niveles de humedad.

Con respecto al factor B (líneas de maíz A, B, C, D, E y F), existe diferencia altamente significativa para todas las variables en estudio. Para la interacción de los

dos factores AB, hay diferencia altamente significativa para las variables IAF, EAF y RG, y diferencia significativa para las variables RB e IC, y no significativa para AMP, DFM, DFF y DE.

Cuadro 4.1. Valores de f calculada (f_c) y f tabulada (f_t) de los análisis de varianza para las variables IAF, AMP, DFM, DFF, EAF, DE, RG, RB e IC.

Variables	Bloques	Factor A	Factor B	Interacción
IAF	0.67 NS	42.78 **	1309.38 **	12.13 **
AMP	8.62 *	12.52 *	92.26 **	1.92 NS
DFM	26.72 **	0.85 NS	159.15 **	0.30 NS
DFF	10.99 *	1.82 NS	328.99 **	0.66 NS
EAF	0.00 NS	13.18 *	74.62 **	4.60 NS
DE	0.82 NS	4.69 NS	6.30 **	1.20 NS
RG	0.01 NS	17.41 *	26.83 **	3.00 **
RB	0.05 NS	30.02 **	78.18 **	2.42 *
IC	0.50 NS	14.75 *	28.67 **	2.81 *
α	Valores de f tabulados (f_t)			
0.05	6.94	6.94	2.53	2.16
0.01	18.00	18.00	3.70	2.98

*, **: significancia a un nivel de probabilidad de 0.05 y 0.01

Indices de Susceptibilidad a Sequía

Los índices de susceptibilidad a sequía calculados en base a rendimiento de grano al 15.5 por ciento de humedad y producción de materia seca (ISS_{rg} y ISS_{rb}) respectivamente, se analizaron como un diseño de bloques al azar y los resultados de los análisis de varianza se muestran en los Cuadros 4.2 y 4.3

En el Cuadro 4.2 se observa que existe diferencia - altamente significativa entre tratamientos (líneas de maíz) para el índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento de grano y diferencia no significativa entre bloques.

En el Cuadro 4.3 se encontró diferencia significativa entre tratamientos para el índice de susceptibilidad a sequía en base a producción de materia seca, también existió diferencia significativa entre bloques.

Cuadro 4.2. Análisis de varianza del índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento de grano - (ISS_{rg}) al 15 por ciento de humedad para las líneas de maíz A, B, C, D, E y F.

FV	GL	SC	CM	Fc	F _{.05}	F _{.01}
Bloques	2	0.158	0.079	1.215 NS	4.10	7.56
Tratamientos	5	2.429	0.486	7.477 **	3.33	5.64
Error Exp.	10	0.645	0.065			
Total	17	3.232				

Cuadro 4.3. Análisis de varianza del índice de susceptibilidad a sequía en base a producción de materia seca (ISS_{rb}) para las líneas de maíz A, B, C, D, E y F.

FV	GL	SC	CM	Fc	F _{.05}	F _{.01}
Bloques	2	0.154	0.077	6.42 *	4.10	7.56
Tratamientos	5	0.213	0.043	3.58 *	3.33	5.64
Error Exp.	10	0.125	0.012			
Total	17	0.492				

Debido a que existe diferencia altamente significativa entre tratamientos (líneas de maíz) para el ISS_{rg} y diferencia significativa para el ISS_{rb}, se procedió a -

efectuar una prueba de comparación de medias de tratamientos de acuerdo a Duncan (1955). Los resultados de dichas pruebas se muestran en los Cuadros 10A y 11A del apéndice. De acuerdo a estos resultados, las líneas de maíz se clasificaron en dos categorías: tolerantes y susceptibles a sequía.

Utilizando el índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento de grano al 15.5 por ciento de humedad, las líneas de maíz C, E y D se clasificaron como tolerantes y las líneas A, B y F como susceptibles a sequía.

En cuanto al índice de susceptibilidad a sequía en base a materia seca (ISS_{rb}), las líneas de maíz C, E, D y A se clasificaron como tolerantes a sequía y como susceptibles las líneas F y B.

Coefficientes de Correlación

Se determinaron los coeficientes de correlación entre los índices de susceptibilidad a sequía (ISS_{rg} e ISS_{rb}) contra las variables de campo del tratamiento de riego de -15 bars, en virtud de que en este tratamiento los coeficientes de correlación fueron más altos que en los demás tratamientos de humedad (-3 y -8 bars). En el Cuadro 4.4 aparecen los resultados de dichas correlaciones. Se puede observar que el ISS_{rg} se correlacionó en forma negativa y significativamente con el índice de cosecha ($r = -0.954^{**}$), eficiencia de área foliar ($r = -0.866^*$), rendimiento de

grano ($r = -0.823^*$) y eficiencia de uso del agua ($r = -0.823^*$). El resto de las variables de respuesta no se correlacionó en forma significativa contra el índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento de grano. Los datos de eficiencia de uso del agua se muestran en el Cuadro 12A del apéndice.

Con respecto al índice de susceptibilidad a sequía en base a materia seca (ISS_{rb}), éste no se correlacionó en forma significativa con ninguna de las variables de respuesta.

Cuadro 4.4. Coeficientes de correlación entre los índices de susceptibilidad a sequía de campo contra las variables de respuesta.

	IC	EAF	RG	EUA	DFP	IAF	DFM	DE	AMP	R
ISS_{rg}	-0.954^{**}	-0.866^*	-0.823^*	-0.823^*	.637	.599	.409	-.223	-.057	.01
ISS_{rb}	-.742	-.658	-.643	-.644	.410	.492	.177	.129	-.304	-.01

*, **: significancia a un nivel de probabilidad de 0.05 y 0.01 respectivamente.

METODOLOGIAS DE LABORATORIO

Germinación de Semillas en Polietilen Glicol 6000 (PEG₆₀₀₀) a Presiones Osmóticas de 0 y -2.0 MPa

Los resultados del análisis del polietilen glicol 6000 con un espectrofotómetro de absorción atómica (modelo 2380 Perkin-Elmer) se muestran en el Cuadro 4.5. El signo (-) indica que el elemento analizado no existe y las concentraciones están expresadas en partes por millón (ppm).

De acuerdo a este análisis, el elemento que se encontró en mayor concentración es el potasio, seguido por el sodio y por último el calcio. Se comprobó que el PEG_{6 000} no está contaminado por elementos tales como cobre, fierro y zinc, que pudieran inducir efectos tóxicos en las semillas.

Cuadro 4.5. Concentración de elementos químicos en una muestra de polietilen glicol 6000

Elemento	Símbolo	Concentración (ppm)
Cobre	Cu	(-)
Fierro	Fe	(-)
Manganeso	Mn	(-)
Zinc	Zn	(-)
Magnesio	Mg	(-)
Sodio	Na	.15
Potasio	K	16.00
Calcio	Ca	0.06

Al analizar los datos del índice de stress en germinación en virtud de que dichos datos están expresados en porcentaje, se transformaron para su análisis de varianza mediante la transformación arcoseno del valor observado, para obtener una distribución normal de los mismos ya que cuando se tienen datos de porcentajes, la distribución en este caso es generalmente binomial (Little y Hills, 1979). Estos datos se muestran en el Cuadro 13A del apéndice.

El análisis de varianza para el índice de stress en germinación (ISG) se muestran en el Cuadro 4.6, encontrándose se diferencia altamente significativa entre tratamientos -

(líneas de maíz).

Cuadro 4.6. Análisis de varianza para el índice de stress en germinación (ISG).

FV	GL	SC	CM	Fc	F _{.05}	F _{.01}
Tratamientos	5	1394.35	278.87	36.94 **	3.11	5.06
Error Exp.	12	90.64	7.55			
Total	17	1484.99				

En el Cuadro 4.7 se muestra el análisis de varianza para el porcentaje de germinación total a una presión osmótica de -2.0 MPa simulada con polietilen glicol 6000. En este análisis se encontró diferencia significativa entre tratamientos (líneas de maíz).

Cuadro 4.7. Análisis de varianza para el porcentaje de germinación total de líneas de maíz en PEG₆₀₀₀ a una presión osmótica de -2.0 MPa.

FV	GL	SC	CM	Fc	F _{.05}	F _{.01}
Tratamientos	5	3041.11	608.22	3.69 *	3.11	5.06
Error Exp.	2	1979.95	165.00			
Total	17	5021.06				

Los resultados de la prueba de comparación de medias de acuerdo a Duncan (1955) para el índice de stress en germinación (ISG) y para el porcentaje de germinación total se muestran en los Cuadros 14A y 15A del apéndice. En base al índice de stress en germinación, las líneas de maíz E, y B se clasificaron como tolerantes a sequía y las líneas A, F y C se clasificaron como susceptibles a sequía. Siend

este resultado coincidente con el obtenido para el porcentaje de germinación total a -2.0 MPa de presión osmótica simulada con PEG 6000.

En la Figura 4.1 se muestran los porcentajes de germinación para las líneas de maíz evaluadas bajo una presión osmótica de -2.0 MPa simulada con PEG 6000. Se puede apreciar que la línea E fue la que presentó un mayor porcentaje de germinación, siguiéndole en orden descendente las líneas D, B, A, C y F.

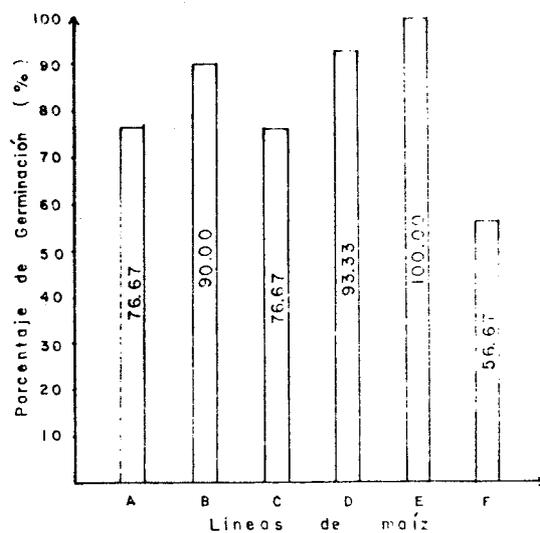


Figura 4.1. Porcentaje de germinación de las líneas de maíz A, B, C, D, E y F, sometidas a una presión osmótica de 2.0 MPa simulada con PEG 6000.

Germinación de Embriones de Semillas en Manitol y Medio Nutritivo a Presiones Osmóticas de 0 y -1.0 MPa

Los resultados de los análisis de varianza para los índices de stress (ISLR, ISLT, ISMSR, ISMST e ISMSTo) se muestran en el Cuadro 4.8. Se puede observar en este cuadro

que existe diferencia significativa entre tratamientos (líneas de maíz) para el ISLR y diferencia altamente significativa para los ISLT e ISMSR, y no se encontró significancia para los índices ISMST e ISMSTo.

Cuadro 4.8. Valores de F_c y F_t de los análisis de varianza para los índices ISLR, ISLT, ISMSR, ISMST e ISMSTo.

VARIABLES	F_c	$F_{.05}$	$F_{.01}$
ISLR	4.94 *	3.11	5.06
ISLT	12.44 **	3.11	5.06
ISMSR	9.06 **	3.11	5.06
ISMST	1.57 NS	3.11	5.06
ISMSTo	.39 NS	3.11	5.06

Para los índices de stress ISLR, ISLT e ISMSR se efectuó una prueba de comparación de medias (Duncan, $\alpha = .05$) para clasificar las líneas de maíz, y cuyos resultados se muestran en el Cuadro 4.9. De acuerdo al ISLR, las líneas A, B, C y D se clasificaron como tolerantes y las líneas F y E como susceptibles a sequía; en cuanto al ISLT, la línea C se clasificó como tolerante a sequía y las líneas D, E, B, A y F como susceptibles a sequía. En base al ISMSR las líneas B, C, D y F se clasificaron como tolerantes a sequía y las líneas A y E como susceptibles a sequía. Los datos de los diferentes índices de stress (ISLR, ISLT, ISMSR, ISMST e ISMSTo) aparecen en el Cuadro 16A del apéndice.

Cuadro 4.9. Clasificación de las líneas de maíz de acuerdo a diferentes índices de stress (Duncan, $\alpha = 0.05$)

Indices de stress	Tolerantes	Susceptibles
ISLR	A, B, C y D	F y E
ISLT	C	D, E, B, A y F
ISMSR	B, C, D y F	A y E

CORRELACION ENTRE LOS INDICES DE STRESS DE CAMPO Y LABORATORIO

Al correlacionar el índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento de grano contra los índices de stress de laboratorio, así como con los porcentajes de germinación total en PEG_{6 000} a -2.0 MPa (%G PEG_{6 000}) y porcentajes de germinación en manitol y medio nutritivo a -1.0 MPa de presión osmótica (%G M), se obtuvieron los resultados que aparecen en el Cuadro 4.10. Se puede apreciar que el ISS_{rg} se correlacionó positiva y significativamente contra el ISS_{rb} ($r = .889^*$) y negativamente en forma significativa con el ISLT ($r = -.832^*$). Con otros índices no se obtuvo correlación significativa.

Cuadro 4.10. Coeficientes de correlación entre el índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento de grano (ISS_{rg}) y los índices de stress de laboratorio.

	ISS _{rb}	ISG	%G PEG _{6 000}	ISLR	ISLT	ISMSR	%G M
ISS _{rg}	.889*	-.185	-.566	.433	-.832*	-.073	.632

* significancia a un nivel de probabilidad de 0.05

Características estructurales de posible importancia en mantener el balance de agua, son el número de estomas y el número de haces del sistema vascular. En este estudio no se encontró asociación significativa entre el índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento de grano (ISS_{rg}) y el número de estomas en forma similar Kilen y Andrew (1969) tampoco encontraron asociación significativa entre el número de estomas y el quemado de la hoja en el campo, ni con las tres técnicas evaluadas.

Las líneas de maíz C, E y D, clasificadas como tolerantes en base al ISS_{rg} , tuvieron un índice de cosecha superior a las demás líneas (.376, .444 y .341) respectivamente en el tratamiento de riego de -15 bars y a la vez presentaron los rendimientos de grano (al 15.5 por ciento de humedad) más altos (C = 3.608, E = 5.560 y D = 4.47 ton/ha). Esto nos indica que líneas de maíz con un índice de cosecha alto, bajo condiciones de déficit hídrico, son más eficientes en la translocación y repartición de fotosintatos (Donald y Hamblin, 1976). Además, un genotipo con un índice de cosecha alto es capaz de soportar altas densidades manteniendo su índice de cosecha alto.

En este trabajo se encontró que las líneas C, E y D, clasificadas como tolerantes a sequía, tendieron a disminuir su índice de cosecha a medida que aumentó el nivel de stress, pero en menor grado que las demás líneas, excepto la línea D que tendió a conservar su índice de cosecha alto

al aumentar el nivel de stress; resultados similares fueron encontrados por Peña (1987).

Los valores de eficiencia de área foliar más altos fueron también presentados por las líneas C, D y E (.136, .145 y .262 kg/m^2) respectivamente, lo cual es un indicio de que estas líneas presentaron un aparato fotosintético más eficiente, lo cual coincide con lo reportado por Vega *et al.* (1987).

Si se analizan los datos del índice de área foliar (IAF) del Cuadro 1A, se puede apreciar que las líneas C, E y D tendieron a disminuir su índice de área foliar en forma más drástica que las demás líneas al pasar de la condición de humedad favorable (tratamiento de riego -3 bars) a la condición de humedad desfavorable (tratamiento de riego -15 bars) lo cual indica que la reducción del área foliar es un mecanismo morfológico de adaptación al déficit hídrico, lo cual coincide con lo mencionado por Kriegg y Hutmacher (1982), Nuñez (1984) y Castro (1987).

Las líneas de maíz C, D y E presentaron también tiempos más cortos a floración femenina a partir de la fecha de siembra (90, 86 y 77 días) respectivamente. Es decir estas líneas son más precoces y se considera la precocidad como un mecanismo de escape a la sequía en virtud de que este mecanismo tiende a minimizar la interacción del déficit hídrico con el genotipo (Levitt, 1972).

En lo que respecta a la eficiencia en el uso del agua (kg m.s de grano/m³ H₂O aplicada) utilizando únicamente la materia comercial (Fischer y Turner, 1978). Las líneas de maíz C, E y D, presentaron mayor eficiencia en el uso del agua (1.158, 1.784 y 1.434 kg de materia seca de grano/m³ H₂O aplicada). De acuerdo a Levitt (1972) la eficiencia en el uso del agua es un mecanismo de evasión a sequía. Al respecto Jasso y Rojas (1982) comentan que una opción interesante para incrementar la eficiencia en el uso del agua, consiste en seleccionar genotipos con mayor acumulación de materia seca por unidad de agua utilizada o genotipos con altas tasas de acumulación de CO₂, los cuales con frecuencia tienen baja respiración. La mayor eficiencia en el uso del agua puede ser explicada en parte por lo encontrado por Muñoz *et al.* (1983) quienes concluyen que las variedades seleccionadas bajo sequía mostraron mayor eficiencia en el uso del agua, en la gama de -3.5 a -9 bars. Debido a que la resistencia total a la difusión del CO₂ es mayor que la resistencia difusiva total del vapor de agua, el cierre estomático produce una reducción mayor de la transpiración que de la fotosíntesis; este mecanismo operó de manera más pronunciada en las variedades obtenidas bajo sequía por un mayor cierre estomático, redundando en una mayor eficiencia en el uso del agua.

Si se analiza el Cuadro 4.11 donde se presentan las tres metodologías evaluadas, clasificación de las líneas de maíz en tolerantes y susceptibles a sequía, así como sus coeficientes de correlación con las variables de campo (IC,

EAF, RG, EUA, DFF y DFM). Se tomó al ISS_{rg} como el índice patrón (de mayor precisión) en virtud de que se correlacionó en forma significativa con el IC = $-.954^{**}$, EAF = $-.866^*$, RG = $-.823^*$ y con EUA = $-.823^*$, así como con el ISS_{rb} = $.889^*$. De los índices estimados con las dos metodologías de laboratorio; el índice de stress en germinación no se correlacionó en forma significativa con ninguna de las variables de campo ni con el ISS_{rg} , coincidiendo con lo observado por Bouslama y Schapaugh (1984) para diferentes genotipos de soya. Sin embargo, el porcentaje de germinación total en PEG_{6000} a una presión osmótica de -2.0 MPa (%G PEG_{6000}) se correlacionó en forma significativa con el rendimiento de grano ($r = -.836^*$) y con la eficiencia de uso del agua ($r = -.836^*$).

El índice de stress de longitud de radícula (ISLR) se correlacionó en forma significativa con las variables de campo días a floración femenina y días a floración masculina ($DFF = .870^*$ y $DFM = .804^*$). El ISMSR y el porcentaje de germinación total a -1.0 MPa de presión osmótica simulada con manitol y medio nutritivo no se correlacionaron en forma significativa con el ISS_{rg} y las variables de campo.

En este trabajo se encontró asociación positiva entre la tolerancia a la presión osmótica y la tolerancia al stress hídrico en el campo, lo que concuerda por lo encontrado por Parmar y Moore (1966), Williams *et al.* (1967).

Cuadro 4.11. Clasificación de las líneas de maíz de acuerdo a los índices de susceptibilidad a sequía de campo y laboratorio, y coeficientes de correlación con las variables de campo.

Indices de stress	Líneas de maíz Tolerantes Susceptibles	ISSrg	Coeficientes de Correlación (r)					
			IC	EAF	RG	EUA	DFM	
ISSrg	C,E,D A,B,F	1	-.954**	-.866*	-.823*	-.823*	.637	.404
ISSrb	C,E,D,A F,B	.899*	-.742	-.658	-.643	-.643	.410	.177
Laboratorio (PEG ₆₀₀₀)								
ISG	E,D,B A,F,C	-.185	.422	.614	.220	.620	-.575	-.565
% G PEG6000	E,D,B C,A,F	-.566	.756	.709	-.836*	-.836*	-.526	-.441
Laboratorio (manitol)								
ISLR	A,B,C,Y D F Y E	.433	-.515	-.756	-.483	-.483	.870*	.804*
ISLT	C D,E,B,A,Y F	-.832*	.713	.464	.434	.435	-.356	-.197
ISMSR	B,C,D,Y F A Y E	.073	.04	-.329	-.273	-.273	.047	-.101
% GM		.632	-.390	-.265	-.312	-.313	-.030	-.250

* : $\alpha = .05$

** : $\alpha = .01$

De las dos metodologías de laboratorio evaluadas, - la de germinación de embriones de semillas de maíz en manitol y medio nutritivo resultó ser la metodología de perspectivas más prometedora en virtud de que permite evaluar parámetros de plántula tales como longitud y peso seco de tallo y radícula, así como porcentajes de germinación, y tener más parámetros de comparación.

La selección de la técnica a usar dependerá del grado de precisión requerido, rapidez y disponibilidad de equipo, ya que ambas metodologías tienen sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, la metodología de campo requiere un lugar o región de escasa precipitación y lo ideal es hacer la evaluación de los genotipos en un período libre de heladas y precipitación, con el fin de manejar a voluntad los regímenes de humedad. Sin embargo, las metodologías de laboratorio son más rápidas y permiten tamizar un gran número de genotipos en un tiempo corto.

En cuanto al papel que desempeñan ambos métodos dentro del contexto general del mejoramiento de la resistencia a sequía, en términos de rendimiento, Muñoz y Ortiz (1971) mencionan que la selección hecha en base a la presión osmótica, no necesariamente aumenta la frecuencia de genes involucrados en el rendimiento, pero en cambio sí aumentan la frecuencia de genes acondicionadores al medio en el cual actúan dichos genes. Por otra parte, la selección de campo en base al rendimiento según el sistema riego-sequía, permite aumentar la frecuencia de los genes para rendimiento. -

pero no necesariamente maximiza la frecuencia de los genes relativos a las tolerancias.

Por lo anterior, se puede decir que los métodos de laboratorio y campo no son excluyentes entre sí, sino complementarios y deben utilizarse alternadamente para maximizar la producción bajo sequía según estrategias o esquemas de mejoramiento que se deseen de acuerdo a las características y modalidades reproductivas de una especie dada. Los métodos de campo no son mejores que los de laboratorio o de invernadero o viceversa, sino que se complementan pues tanto los unos como los otros se basan en la veracidad de los hechos, es decir, ambos son procesos científicos.

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir lo siguiente:

- La tolerancia a la presión osmótica simulada con polietilén glicol 6000 o manitol más medio nutritivo, como un índice de tolerancia a sequía, resultó satisfactoria en virtud de que se encontró correlación significativa con las variables de campo.

- El índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento de grano (ISS_{rg}) resultó ser el índice más eficiente para clasificar a las líneas de maíz en base a su tolerancia a stress hídrico en términos de rendimiento, en virtud de que se correlacionó en forma significativa con el índice de cosecha ($IC = -.954^{**}$), eficiencia de área foliar ($EAF = -.866^{*}$), rendimiento de grano ($RG = -.823^{*}$) y eficiencia de uso del agua ($EUA = -.823^{*}$).

• - De acuerdo al índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento de grano (ISS_{rg}) las líneas de maíz C, E y D resultan ser tolerantes a sequía y las líneas A, y F son susceptibles a sequía.

- De las variables medidas en campo, se encontró que el índice de cosecha (IC), eficiencia de área foliar (EAF), rendimiento de grano (RG) y eficiencia de uso del agua (EUA) de las líneas de maíz sometidas a una tensión de humedad del suelo de -1.5 MPa, son variables indicadoras en términos de rendimiento y eficiencia de uso del agua de la tolerancia al stress hídrico.

- De los índices de stress de las metodologías de laboratorio, el índice de stress de longitud de tallo (ISLT) fue el índice que se correlacionó en forma significativa con el índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento de grano (ISS_{rg}).

- De las dos metodologías de laboratorio evaluadas, la de germinación de embriones de semillas de maíz en manitol y medio nutritivo es la que ofrece perspectivas más prometedoras en virtud de que permite evaluar parámetros de plántula tales como longitud de tallo y radícula, así como materia seca de tallo, radícula, porcentaje y velocidad de germinación.

- La selección de la metodología a usar estará en función de la precisión requerida, rapidez y disponibilidad de equipo.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Se evaluaron tres metodologías para seleccionar genotipos de maíz tolerantes a sequía, una metodología de campo y dos de laboratorio, utilizando seis líneas de maíz: AN-43 (línea A) SSE-18-19 (línea B), AN-20 (línea C), Nepoprec₁ (línea D), Nepoprec₂ (línea E) y B₂ (línea F) proporcionadas por el Instituto Mexicano del maíz.

La metodología de campo consistió en someter a las líneas de maíz a tres tensiones de humedad del suelo (-3, -8 y -15 bars); en este experimento se midieron variables tales como el índice de área foliar (IAF), altura máxima de la planta (AMP), días a floración masculina y femenina (DFM y DFF), eficiencia de área foliar (EAF), densidad estomática (DE), rendimiento de grano (RG), rendimiento biológico (RB), índice de cosecha (IC) y eficiencia en el uso del agua (EUA). A la vez se estimaron dos índices de susceptibilidad a sequía, uno en base a rendimiento de grano y otro en base a rendimiento biológico (ISS_{rg} e ISS_{rb}).

Las dos metodologías de laboratorio fueron: a) germinación de semillas en polietilén glicol 6000 (PEG₆₀₀₀) a

presiones osmóticas de 0 y -2.0 MPa; b) germinación de embriones de semillas en manitol y medio nutritivo a presiones osmóticas de -0.35 y -1.0 MPa. Con estas metodologías de laboratorio se estimaron los índices de stress en germinación (SG), índice de stress de longitud de tallo (ISLT), índice de stress de longitud de radícula (ISLR), índice de stress de materia seca de radícula (ISMSR), índice de stress de materia seca del tallo (ISMST) e índice de stress de materia seca total (ISMSTo).

Se encontró que el ISS_{rg} resultó ser el índice más eficiente para clasificar las líneas de maíz en base a su tolerancia al stress hídrico en términos de rendimiento en virtud de que se correlacionó en forma significativa con el índice de cosecha ($r = -.954^{**}$), eficiencia de área foliar ($r = -.866^{*}$), rendimiento de grano ($r = -.823^{*}$), eficiencia de uso del agua ($r = 0.823^{*}$) así como con el índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento biológico ($r = .889^{*}$).

En base al ISS_{rg} las líneas de maíz C, E y D, se clasificaron como tolerantes a sequía y las líneas A, B y F como susceptibles a sequía.

También se encontró asociación significativa entre el ISS_{rg} y el ISLT ($r = -.832^{*}$). Se concluye que la tolerancia a la presión osmótica simulada con polietilen glicol 6000 o manitol más medio nutritivo como un índice de tolerancia a sequía, resultó satisfactoria en virtud de que se

encontró correlación significativa con las variables de campo.

De las dos metodologías de laboratorio evaluadas, la de germinación de embriones de semillas de maíz en manitol y medio nutritivo, es la metodología que ofrece perspectivas más prometedoras en virtud de que permite evaluar parámetros de plántula tales como longitud de tallo y radícula, así como materia seca de tallo, radícula y porcentaje velocidad de germinación.

LITERATURA CITADA

- Acevedo, E., T.C. Hsiao and J.W. Henderson. 1971. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status. *Plant Physiol.* 48:631-639
- Barrs, H.S. and P.E. Weatherley. 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Aust. J. Biol. Sci.* 15: 413-428.
- Begg, J.E. 1980. Morphological adaptations of leaves to water stress. In: N.C. Turner and P.J. Kramer (Eds) *Adaptation of plants to water and high temperature stress.* John Wiley Sons. New York. pp. 33-42.
- _____ and N.C. Turner. 1976. Crop water deficits. *Adv. Agron.* 28:161-217.
- Bousslama, M. and W.T. Schapaugh. 1984. Stress tolerance soybeans I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Sci.* 24:933-937.
- Boyer, J.S. 1970. Differing sensitivity of photosynthesis to low leaf water potentials in corn and soybeans. *Plant Physiol.* 46:236-239.
- Brown, P.W. and C.B. Tanner. 1983. Alfalfa osmotic potential: a comparison of the water-release curve and frozen tissue methods. *Agron. J.* 75:91-93.

- Castro B., F. 1987. Respuestas morfofisiológicas de dos especies de frijol (*Phaseolus vulgaris* L., *P. acutifolius* A. Gray) a sequía simulada con polietilén glicol bajo condiciones de invernadero. Tesis profesional. Universidad Juárez del Estado de Durango. Escuela Superior de Biología. Gómez Palacio, Dgo., México. 54 p.
- Clarke, J.M. and T.N. Mc Caig. 1982. Evaluation of techniques for screening for drought resistance in wheat. *Crop. Sci.* 22:503-505.
- _____, T.F. Townley-Smith, T.N. Mc Caig and D.G. Gree 1984. Growth analysis of spring wheat cultivars of varying drought resistance. *Crop Sci.* 24:537-541.
- Cutler, J.M., D.W. Rains and R.S. Loomis. 1977. Role of changes in solute concentration in maintaining favorable water balance in field grown cotton. *Agron. J* 69:773-779.
- Chavira, D., M.E. 1986. Osmorregulación en tres variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Tesis profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 63 p.
- Donald, C.M. and J. Hamblin. 1976. The biological yield and harvest index of cereal as agronomic and plant breeding criteria. *Adv. Agron.* 23:361-405.
- Duncan, D.B. 1955. Multiple range and multiple F. test. *Biometrics.* 11:1-42.
- Espinoza Z., R. y S. Kuruvadi. 1985. Evaluación de doce colecciones de zacate gigante (*Leptochloa dubia* HBK, Ness) por su grado de resistencia a sequía en manitol. *Agraria* 1(2) UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

- Fischer, R.A. 1980. Influence of water stress on crop yield in semiarid regions. In: Adaptation of plant to water and high temperature stress. (Ed.) N.C. Turner, and P.J. Kramer. Wiley, New York.
- _____ and R. Maurer. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield response. Aust. J. Agric. Res. 29:897-912.
- _____ and M. Sánchez. 1979. Drought resistance in spring wheat cultivars. II. Effects on plant water relations. Aust. J. Agric. Res. 30:801-814.
- Fischer, K.S., N.C. Johnson and G.O. Edmeades. 1983. Breeding and selection for drought resistance in tropical maize. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. El Batán, México. 17 p.
- García, A., D. 1985. Evaluación de material genético de maíz bajo el sistema riego-sequía. Mimeógrafo PRONAPA INIA. Gómez Palacio, Dgo., México. pp. 15-20.
- Gergely, I., R.F. Korcak and M. Faus. 1980. Polyethylene glycol induced water stress effects in apple seedlings I. Methodology, water consumption and dry water production. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 105(6): 854-857.
- Godoy A., C. 1983. Osmorregulación o ajuste osmótico en plantas. Seminario Técnico. CIAN-INIA-SARH. Matamoros, Coahuila, México.
- Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. Ann. Rev. of Plant Physiol. 24:519-570.
- _____ and E. Acevedo. 1974. Plant responses to water deficits, water use efficiency and drought resistance. Agric. Met. 14:59-84.

- Hsiao, T.C., F. Acevedo, E. Fereres and D.W. Henderson. 1976. Stress metabolism, water stress, growth, and osmotic adjustment. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B* 273: 479-500.
- Hurd, E.A. 1976. Plant breeding for drought resistance. In: T.T. Kozlowski. (Ed). *Water deficits and plant growth* Academic Press. New York. pp. 317-353.
- Jasso I., R. 1985. Expresión y medición del estado hídrico interno en tejidos vegetales. Tópico R.D.-500-06 UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 15 p.
- _____ y M.E. Chavira D. 1986. Osmorregulación en tres variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). XIX - Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Programa y Resúmenes. Manzanillo, Colima, México. 1 p.
- _____ y L. Rojas P. 1982. Manual de relación agua-suelo -planta. Departamento de Riego y Drenaje. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 152 p.
- Johnson, R.C., H.T. Nguyen and L.I. Croy. 1984. Osmotic adjustment and solute accumulation in two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Sci.* 24:957-961.
- Jones, M.M., N.C. Turner and C.B. Osmond. 1981. Mechanisms of drought resistance. In: *Physiology and Biochemistry of drought resistance in plants*. Ed. L. Paleg, D. Aspinall. pp. 15-37. Sydney: Academic. New York.
- Kilen, T.C. and R.H. Andrew. 1969. Measurement of drought resistance in corn. *Agron. J.* 61:779-671.
- Klepper, B.D. 1970. Root growth in cotton. In: *Plant-root system* (ed.) Russell, R.S. Mc Graw Hill, London. pp. 153-180.

- Kramer, P.M. 1974. Relaciones hídricas de suelos y plantas. Una síntesis moderna. EDUTEX, S.A. México. 538 p.
- . 1980. Drought stress and the origin of adaptations. In: adaptation of plant to water and high temperature stress (Ed.) N.C. Turner and P.J. Kramer. Wiley. New York. U.S.A.
- Kriedemann, P.E. and R.E. Smart. 1971. Stomatal conduction and photosynthesis. *Photosynthetic*. 5:6-15.
- Kriegg, D.R. and R.B. Hutmacher. 1982. The utility of various drought resistance mechanism. 37th Ann. Corn and Sorghum Res. Conf. 37:37-51.
- Kuruvadi, S. 1980. Genetic studies on dry land wheat. Post Doctoral research investigation submitted to I.D.R. Canadá.
- Levitt, J. 1972. Responses of plant to environmental stress. Academic Press. New York, USA. 697 p.
- Little, M.T. and J. Hills. 1979. Métodos estadísticos para la investigación en agricultura. 1a. edición. Ed. Trillas, México.
- López R., M.T. 1985. Variación de algunos parámetros agronómicos osmóticos y de elasticidad en una colección de materiales de chile ancho (*Capsicum annum* L.). Tesis profesional UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 90 p.
- Lorenz, G.F., J.M. Bennet and L.B. Loggale. 1987. Differences in drought resistance between two corn hybrids I. Water relations and root length density. *Agron. J.* 79:802-807.

- Michel, B.E. 1983. Evaluation of the water potentials of solutions of polyethylene glycol 8000, both in absence and presence other solutes. *Plant Physiol.* 72:66-70.
- _____ and M.R. Kaufmann. 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiol.* 51:914-916.
- Milburn, J.A. and R.P. Johnson. 1966. The conduction of sa II. Detection of vibration by sap cavitation in re sinus xylems. *Plant.* 69:43-52.
- Montgomery, E.G. 1911. Correlation studies in corn. *Neb. Agric. Exp. Sta. Ann. Rep.* 24:108-159.
- Morgan, J.M. 1984. Osmorregulation and water stress in higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 35:299-319
- Muñoz O., A. 1978. Técnicas de investigación para resistencia a sequía y heladas en maíz. VIII Reunión de Maizeros de la Zona Andina y I Reunión Lationamericana de Maíz. Lima, Perú.
- _____ y J. Ortiz C. 1971. Problemas del mejoramiento de la producción bajo sequía en maíz. *Esc. de Agri Univ. de Guadalajara. IV Congreso de Fit. México.*
- _____, K.R. Stevenson, C.J. Ortiz, G.W. Thurtell and C.A. Caballo. 1983. Transpiración, fotosíntesis, eficiencia en uso de agua y potencial hídrico en maíz resistentes a sequía y heladas. *Agrociencia.* 51:11-153.
- Murashige, T. and T. Skoog. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiology P l.* 15:473-497.

- Newman, E.T. 1969. Resistance to water flow in soil and plants. A review of experimental evidence on the rhizosphere resistance. *J. Appl. Ecol.* 6:261-271.
- Núñez B., A. 1984. El agua en el sistema suelo-planta-atmósfera. CAEVAG-CIANOC-INIA-SARH. Tema didáctico No. 1. Durango, Dgo., México. 15 p.
- Oppenheimer, R.R. and N. Engelberg. 1965. Drought and plant development. In: "Methodology of plant Eco-physiology" (F.E. Eckardt, ed.). pp. 317-323. UNESCO, París.
- O'Toole, J.C. and T.T. Chang. 1979. Drought resistance in cereals; rice a case study. Mussell, H. and R.C. Staples (Eds.). *Stress physiology in corn plants*. pp. 373-403. Willey Interscience. New York.
- _____, N.C. Turner, O.P. Namuco, M. Dingkuhn and K. Gómez. 1984. Comparison of some crop water stress measurement methods. *Crop Sci.* 24:1121-1128.
- Parmar, H.T. and R.P. Moore. 1966. Effect of simulated drought by polyethylene glycol solutions on corn (*Zea mays* L.) germination and seedling development. *Agron. J.* 58:381-392.
- Passioura, J.B. 1972. The effects of root geometry on the yield of wheat growing on stored moisture. *Aust. J. Agric. Res.* 23:745-752.
- Peña R., A. 1987. Efecto de la sequía en dos etapas fenológicas de maíz. I. Rendimiento, componentes e índice de cosecha. XX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Programa y resúmenes. Zacatecas, Zac. México. 1
- Raschke, K. 1975. Stomatal action. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 26:309-340.

- Rodríguez, Z.C. 1980. Informe de actividades como estudiant del doctorado. Colegio de Postgraduados. Chapingo México. 15 p.
- Russell, R.A. 1977. Plant-root systems. Mc Graw Hill, Lond pp. 90-112.
- Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1978. Plant Physiology, wad worth Publishing Company. Ind. Belmont. Cal. USA. pp. 304-316.
- Shaw, R.H. 1977. Climatic requirement. Corn and corn impro vement. G.F. Sprague, ed. Am. Soc. Agron 18:591-6
- Slatyer, R.I. 1967. Plant-water relationships. Academic Pr New York. 366 p.
- Smart, R.E. and G.E. Bingham. 1974. Rapid estimates of rel tive water content. Plant Physiol. 53:258-260.
- Steudle, E., V. Zimmermann and N. Luttge. 1977. Effect of turgor pressure and cell size on the wall. Elasti ty of plant cells. Plant Physiol. 59:285-289.
- Steuter, A.A., A. Mozafar and J.R. Goodin. 1981. Water pot tial of aqueous polyethylene glycol. Plant Physio 66:64-67.
- Sullivan, Y.Ch. 1983. Genetic variability in physiological mechanism of drought resistence. Iowa State. J. R 57(4):423-439.
- Tinker, P.B. 1980. Root-soil interactions in crop plants. Soils and agriculture. Tinker, P.B. (Ed.). Soc. o Chemical Industry. London. 1-3 pp. USA.
- Turner, M.C., J.E. Begg. 1981. Plant water relations and adaptations to stress. Plant and soil 58:97-131.

- Turner, N.C. and M.M. Jones. 1980. Turgor maintenance by osmotic adjustment: a review and evaluation. In: N.C. Turner and P.J. Kramer (Eds.). Adaptation of plants to water and high temperature. Wiley Interscience. New York. pp. 89-103.
- _____ and P.J. Kramer. 1980. Morphological adaptation to water stress. In: Adaptation of plants to water and high temperature stress (Ed.) N.C. Turner and P.J. Kramer. Wiley. New York.
- Vaadia, Y., F.C. Raney and R.M. Hagan. 1961. Plant water deficits and physiological processes. Ann. Rev. Plant Physiol. 12:265-294.
- _____. 1984. The impact of plant stresses on crop yield. Arco plant cell research. Institute 6560. Trinity Court. Dublin, California 94568 (sin publicar).
- Vega S., P., S. Vega, M.C. y D. Cepeda J.M. 1987. Influencia de dos mejoradores del suelo y programas de riego en dos híbridos de maíz contrastantes, evaluados a través del análisis de crecimiento y componentes del rendimiento. XX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Programa y resúmenes. Zacatecas, Zac., México. 1 p.
- Viqueira L., L. Gómez y C. Rodríguez R. 1981. Efecto de la sequía simulada mediante PEG 4000 en la variedad de caña de azúcar Ja 60-5. Ciencias de la agricultura 9:51-59. Cuba.
- Wardlaw, I.F. 1967. Water stress leaves in *Triticum aestivum* L. Aust. J. Biol. Sci. 20:53-39.
- Watson, D.M. 1952. The physiology basis of variation in yield. Adv. Agron. 4:101-145.

- Watts, W.R. 1974. Leaf extension in *Zea mays* L. III. Field measurements of leaf extension in response to temperature and leaf water potential. *J. Exp. Bot.* 25: 1085-1096.
- Wiebe, H.H. 1980. Morphological adaptations to water stress in adaptation of plant to water and high temperature stress (Ed.) N.C. Turner and P.J. Kramer. Wiley. New York.
- Wilson, J.R., M.J. Fischer, E.D. Schulza, G.R. Dolby and M. M. Ludlow. 1979. Comparison between pressure-volume and dew point-hygrometry techniques for determining the water relation characteristics of grass and legume leaves. *Ecology* 41:77-88.
- Williams, T.V., R.S. Snell and J.F. Ellis. 1967. Methods of measuring drought tolerance in corn. *Crop Sci.* 7: 175-181.
- Wong, R.R. 1979. Comportamiento de las características agronómicas, índices fisiológicos y patrones de crecimiento de cincuenta genotipos de sorgo bajo el sistema riego-sequía. Tesis M.C. Centro de Genética. Colección de Postgraduados. Chapingo, México.
- Zur, B. 1966. Osmotic control of the matric soil water potential. I. Soil water system. *Soil Sci.* 102(6):394-401.

A P E N D I C E

Cuadro 1.A. Índice de área foliar

Tratamientos de humedad		A	B	C	D	E	F
- 3 bars	R ₁	5.182	3.534	2.724	3.080	2.266	2.4
	R ₂	5.181	3.532	2.723	3.255	2.267	2.4
	R ₃	5.181	3.535	2.726	3.256	2.265	2.4
	\bar{x}	5.181	3.534	2.724	3.197	2.266	2.4
- 8 bars	R ₁	4.990	3.052	2.573	2.877	2.068	2.4
	R ₂	4.988	3.052	2.573	2.875	2.069	2.4
	R ₃	4.988	3.053	2.573	2.876	2.068	2.4
	\bar{x}	4.989	3.052	2.573	2.876	2.068	2.4
- 15 bars	R ₁	5.048	3.499	2.239	2.836	1.794	2.5
	R ₂	5.046	3.499	2.241	2.835	1.793	2.5
	R ₃	5.048	3.499	2.240	2.200	1.794	2.5
	\bar{x}	5.048	3.499	2.240	2.624	1.794	2.5

Cuadro 2.A. Altura máxima de planta (AMP), en cm.

Tratamientos de humedad		Líneas de Maíz					
		A	B	C	D	E	F
- 3 bars	R ₁	209.4	99.8	148.0	183.0	171.6	199
	R ₂	192.2	97.8	143.5	160.1	158.1	196
	R ₃	193.3	90.7	138.2	151.9	158.9	177
	\bar{x}	198.3	96.1	143.2	165.0	162.9	189
- 8 bars	R ₁	199.7	103.6	146.2	147.2	173.4	150
	R ₂	164.5	99.8	148.8	146.7	168.0	167
	R ₃	171.9	100.8	148.4	158.3	148.5	166
	\bar{x}	178.7	101.4	147.8	150.73	163.3	167
- 15 bars	R ₁	183.9	92.8	155.0	163.0	151.4	163
	R ₂	165.9	89.2	131.4	145.7	154.4	177
	R ₃	165.7	84.9	138.9	118.3	134.9	168
	\bar{x}	171.8	89.0	141.8	142.3	146.9	169

Cuadro 3.A. Días a floración masculina (DFM) a partir de fecha de siembra.

Tratamientos de humedad		Líneas de Maíz			E	
		A	B	C		
- 3 bars	R ₁	101	88	86	81	80
	R ₂	101	83	87	81	78
	R ₃	102	90	89	81	78
	\bar{x}	101	87	87	81	79
- 8 bars	R ₁	101	83	86	81	78
	R ₂	101	84	87	81	78
	R ₃	102	88	90	81	78
	\bar{x}	101	85	88	81	78
- 15 bars	R ₁	101	83	86	81	80
	R ₂	101	84	87	81	78
	R ₃	102	91	91	82	78
	\bar{x}	101	86	88	81	79

Cuadro 4.A. Días a floración femenina (DFF) a partir de fecha de siembra.

Tratamientos de humedad		Líneas de Maíz			E	
		A	B	C		
- 3 bars	R ₁	110	95	88	83	78
	R ₂	110	89	88	83	76
	R ₃	110	96	92	84	76
	\bar{x}	110	93	89	83	77
- 8 bars	R ₁	108	90	88	83	76
	R ₂	111	90	90	83	76
	R ₃	110	96	92	84	76
	\bar{x}	110	92	90	83	76
- 15 bars	R ₁	107	90	89	84	78
	R ₂	110	94	90	83	76
	R ₃	110	98	92	90	76
	\bar{x}	109	94	90	86	77

Cuadro 5.A. Eficiencia de área foliar (EAF) (kg/m²)

Tratamientos de humedad		Líneas de Maíz					
		A	B	C	D	E	
- 3 bars	R ₁	0.111	0.136	0.151	0.211	0.264	0.
	R ₂	0.152	0.145	0.129	0.195	0.294	0.
	R ₃	0.121	0.155	0.129	0.184	0.247	0.
	\bar{x}	0.128	0.145	0.136	0.197	0.268	0.
- 8 bars	R ₁	0.115	0.133	0.114	0.198	0.206	0.
	R ₂	0.078	0.115	0.104	0.199	0.274	0.
	R ₃	0.116	0.146	0.076	0.197	0.257	0.
	\bar{x}	0.103	0.131	0.098	0.198	0.246	0.
- 15 bars	R ₁	0.050	0.031	0.147	0.170	0.268	0.
	R ₂	0.046	0.071	0.129	0.111	0.236	0.
	R ₃	0.067	0.080	0.132	0.153	0.283	0.
	\bar{x}	0.054	0.061	0.136	0.145	0.262	0.

Cuadro 6.A. Densidad estomática (DE) (Número de estomas/mm)

Tratamientos de humedad		Líneas de Maíz					
		A	B	C	D	E	
- 3 bars	R ₁	21	23	23	24	25	2
	R ₂	23	25	21	26	25	2
	R ₃	19	23	19	21	20	2
	\bar{x}	21	24	21	24	23	2
- 8 bars	R ₁	23	26	24	30	27	2
	R ₂	23	26	24	26	27	2
	R ₃	21	28	24	26	32	2
	\bar{x}	22	27	24	27	29	2
- 15 bars	R ₁	23	26	20	23	26	2
	R ₂	24	23	20	27	22	2
	R ₃	23	24	23	21	27	2
	\bar{x}	23	24	21	24	25	2

Cuadro 7.A. Rendimiento de grano (RG) al 15.5 por ciento humedad en toneladas/hectárea.

Tratamientos de humedad		Líneas de Maíz				
		A	B	C	D	E
- 3 bars	R ₁	6.798	5.685	4.871	7.682	7.085
	R ₂	9.335	6.080	4.155	7.505	7.888
	R ₃	7.393	6.474	4.147	7.081	6.612
	\bar{x}	7.842	6.080	4.391	7.423	7.195
- 8 bars	R ₁	6.770	4.819	3.464	6.746	5.041
	R ₂	4.587	4.154	3.152	6.785	6.702
	R ₃	6.873	5.283	2.313	6.706	6.280
	\bar{x}	6.077	4.752	2.976	6.746	6.008
- 15 bars	R ₁	2.990	1.287	3.907	5.714	5.681
	R ₂	2.746	2.941	3.420	3.724	5.000
	R ₃	3.991	3.324	3.498	3.971	6.000
	\bar{x}	3.242	2.521	3.608	4.470	5.560

Cuadro 8.A. Materia seca total (RB) en toneladas/hectár

Tratamientos de humedad		Líneas de Maíz				
		A	B	C	D	E
- 3 bars	R ₁	20.118	12.831	9.345	15.163	13.155
	R ₂	24.351	14.064	9.709	14.428	14.489
	R ₃	21.740	14.297	10.337	14.969	13.880
	\bar{x}	22.070	14.064	9.797	14.853	13.841
- 8 bars	R ₁	20.570	12.110	9.228	14.053	10.023
	R ₂	17.103	13.363	8.171	13.824	13.943
	R ₃	20.126	11.813	8.596	14.281	12.130
	\bar{x}	19.266	12.429	8.665	14.053	12.032
- 15 bars	R ₁	16.117	7.156	9.345	12.865	10.838
	R ₂	13.749	8.790	7.315	10.656	9.830
	R ₃	15.449	9.421	7.786	9.490	11.072
	\bar{x}	15.105	8.456	8.149	11.004	10.580

Cuadro 9.A. Índice de Cosecha (IC)

Tratamientos de humedad		Líneas de Maíz					
		A	B	C	D	E	
- 3 bars	R ₁	0.286	0.374	0.440	0.428	0.455	0.
	R ₂	0.324	0.298	0.362	0.440	0.460	0.
	R ₃	0.287	0.358	0.339	0.400	0.403	0.
	\bar{x}	0.299	0.343	0.380	0.423	0.439	0.
- 8 bars	R ₁	0.278	0.336	0.317	0.406	0.425	0.
	R ₂	0.227	0.263	0.326	0.415	0.406	0.
	R ₃	0.228	0.378	0.227	0.397	0.440	0.
	\bar{x}	0.244	0.326	0.290	0.406	0.424	0.
- 15 bars	R ₁	0.157	0.152	0.352	0.375	0.443	0.
	R ₂	0.169	0.283	0.395	0.295	0.430	0.
	R ₃	0.218	0.298	0.380	0.354	0.458	0.
	\bar{x}	0.181	0.244	0.376	0.341	0.444	0.

Cuadro 10.A. Comparación de medias (Duncan, $\alpha = .05$) del índice de susceptibilidad a sequía en base a rendimiento de grano (ISS_{rg}) al 15.5 por ciento humedad.

Comp.	0.509 0.320 (C)	0.504 0.322 (E)	0.495 0.723 (D)	0.485 1.040 (A)	0.463 1.071 (B)	1.263 (F)
1.263 (F)	0.943	0.941	0.540	0.223 NS	0.192 NS	0
1.017 (B)	0.751	0.749	0.348 NS	0.031 NS	0	
1.040 (A)	0.72	0.718	0.317 NS	0	C E D A B F	
.723 (D)	0.403 NS	0.401 NS	0			
.322 (E)	0.002 NS	0				
.320 (C)	0					

Cuadro 11.A. Comparación de medias (Duncan, $\alpha = .05$) del índice de susceptibilidad a sequía en base a materia seca (ISS_{rb})

Comp.	0.225 0.233 (C)	0.223 0.330 (E)	0.219 0.368 (D)	0.215 0.436 (A)	0.205 0.494 (F)	0.565 (B)
0.565 (B)	0.332	0.235 NS	0.197 NS	0.129 NS	0.071 NS	0
0.494 (F)	0.261	0.164	0.126	0.058	0	
0.436 (A)	0.203 NS	0.106	0.068	0		
0.368 (D)	0.135	0.038	0		C E D A F B	
0.330 (E)	0.097	0				
0.233 (C)	0					

Cuadro 12.A. Eficiencia de uso del agua (EUA) kg de n
grano/m³ de agua aplicada.

Niveles de humedad		A	Líneas B	de C	Maíz D	E
- 3 bars	R ₁	1.291	1.080	0.925	1.459	1.345
	R ₂	1.773	1.155	0.789	1.425	1.498
	R ₃	1.404	1.230	0.788	1.345	1.256
	\bar{x}	1.489	1.155	0.834	1.410	1.366
- 8 bars	R ₁	1.667	1.187	0.853	1.661	1.242
	R ₂	1.130	1.023	0.776	1.671	1.651
	R ₃	1.693	1.301	0.569	1.651	1.546
	\bar{x}	1.497	1.170	0.733	1.661	1.480
- 15 bars	R ₁	0.959	0.413	1.254	1.833	1.822
	R ₂	0.881	0.942	1.097	1.195	1.604
	R ₃	1.280	1.066	1.122	1.274	1.925
	\bar{x}	1.04	0.807	1.158	1.435	1.784



00000

Cuadro 13.A. Porcentajes de germinación total e índice de stress en germinación (ISG) a una presión osmótica de -2.0 MPa simulada con PEG 6000.

	Porcentaje de Germinación					
	Líneas		de		Maíz	
	A	B	C	D	E	F
	70.00	100.00	100.00	90.00	100.00	80.00
	80.00	90.00	60.00	90.00	100.00	60.00
	80.00	80.00	70.00	100.00	100.00	30.00
\bar{x}	76.67	90.00	76.67	93.33	100.00	56.67
Daños transformados (arcoseno del valor observado)						
	56.79	90.00	90.00	71.57	90.00	63.44
	63.44	71.57	50.77	71.57	90.00	50.77
	63.44	63.44	56.79	90.00	90.00	33.44
\bar{x}	61.22	75.00	65.85	77.71	90.00	49.17
Indices de stress en germinación (ISG) %						
	40.00	65.00	32.50	65.00	78.75	45.00
	56.41	60.00	34.29	67.57	82.50	47.00
	51.28	52.50	32.50	66.29	75.00	46.00
\bar{x}	49.23	49.17	33.10	66.29	78.75	46.00
Datos transformados (arcoseno del valor observado)						
	39.23	53.73	34.76	53.73	62.55	42.00
	48.68	50.77	35.84	55.29	65.27	43.00
	45.73	46.43	34.76	54.51	60.00	42.00
\bar{x}	44.55	50.31	35.12	54.51	62.61	42.00

Cuadro 14.A. Comparación de valores medios del índice de stress en germinación (ISG) para las líneas de maíz A, B, C, D, E y F (Duncan, $\alpha = .05$)

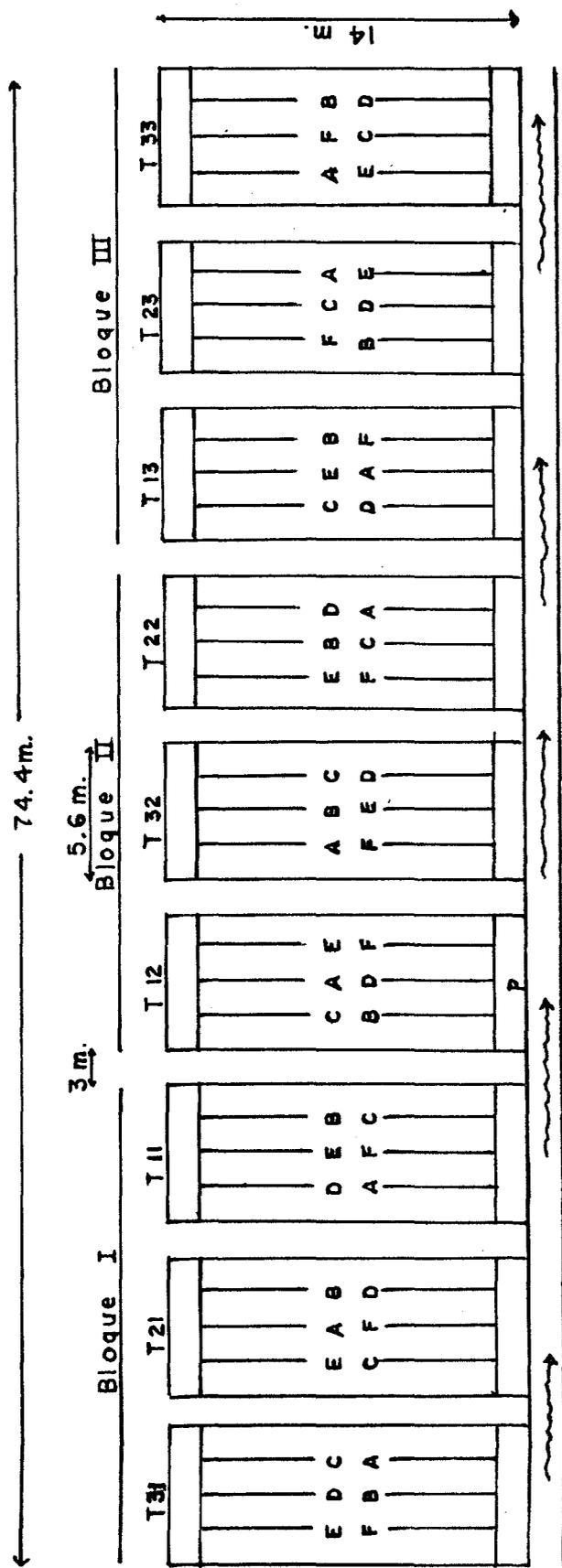
Comp.	5.41	5.34	4.29	4.90		
	35.12	42.85	44.55	50.31	54.51	62
62.61 (E)	27.49	19.76	18.06	12.3	8.1	
54.51 (D)	19.39	11.66	9.96	4.2 NS	0	
50.31 (B)	15.19	7.46	5.76	0		
44.55 (A)	9.43	1.70 NS	0	C	F	A B D E
42.85 (F)	7.73	0				
35.12 (C)	0					

Cuadro 15.A. Comparación de valores medios del porcentaje germinación total de las líneas de maíz A, B, D, E y F a una presión osmótica de -2.0 MPa s lada con PEG 6000 (Duncan, $\alpha = .05$)

Comp.	25.23	24.93	24.71	23.97	22.85	
	49.14	61.22	65.85	75.00	77.71	90
90.00 (E)	40.86	28.78	24.15	15.00	12.29	
77.71 (D)	28.57	16.49	11.86	2.71	0	
75.00 (B)	25.86	13.78	9.15	0		
65.85 (C)	16.71	4.63	0	F	A	C B D E
61.22 (A)	12.08	0				
49.14 (F)	0					

Cuadro 16.A. Índices de stress (ISLR, ISLT, ISMSR, ISMST, ISMSTo) en manitol y medio nutritivo, a una presión osmótica de 1.0 MPa.

	Líneas de Maíz					
	A	B	C	D	E	F
Índice de stress de longitud de radícula (ISLR)						
	42.31	31.08	50.00	28.85	0	23.
	38.71	43.64	62.50	23.21	0	14.
	100.00	82.50	20.00	35.19	0	37.
\bar{x}	60.34	52.41	44.17	29.08	0	25.
Índice de stress de longitud de tallo (ISLT)						
	19.05	28.89	100.00	80.00	25.53	14.
	36.00	26.67	95.00	30.65	56.67	24.
	33.33	51.11	100.00	41.24	71.43	29.
\bar{x}	29.46	35.56	98.33	50.63	51.21	22.
Índice de stress de materia seca de radícula (ISMSR)						
	2.92	80.22	57.93	68.50	0	27.
	5.91	56.54	84.00	40.00	0	17.
	22.06	78.13	14.66	21.00	0	10.
\bar{x}	10.30	71.63	52.20	43.17	0	18.
Índice de stress de materia seca del tallo (ISMST)						
	34.80	65.60	77.68	75.74	48.97	27.
	75.30	66.52	93.98	40.47	89.55	35.
	100.00	82.47	100.00	39.31	80.11	78.
\bar{x}	70.03	71.53	90.55	51.84	72.88	46.
Índice de stress de materia seca total (ISMSTo)						
	30.89	69.11	71.61	73.95	31.71	13.
	34.49	65.70	84.71	40.39	58.02	26.
	77.64	81.57	42.73	83.25	50.09	94.
\bar{x}	47.67	72.13	66.35	65.86	46.61	44.



Factores en Estudio

Tensiones Líneas de maíz

T₁ = -3bars A, B,

T₂ = -8bars C, D,

T₃ = -15bars E, F,

r = 3

p = protecciones