



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

CAMPUS TABASCO
PROGRAMA EN PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

EFFECTO DEL RIEGO Y LA FERTILIZACIÓN FOSFATADA SOBRE EL
RENDIMIENTO Y CALIDAD EN MAÍZ ELOTERO (*Zea mays* L.)

BENIGNO RIVERA HERNÁNDEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA

OBTENER EL GRADO DE

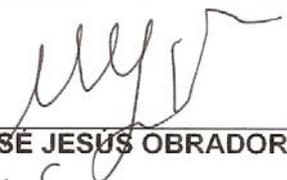
MAESTRO EN CIENCIAS

La presente tesis titulada: **EFFECTO DEL RIEGO Y FERTILIZACIÓN FOSFATADA SOBRE EL RENDIMIENTO Y CALIDAD EN MAÍZ ELOTERO (*Zea mays* L.)**, realizada por el estudiante: **BENIGNO RIVERA HERNÁNDEZ**, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO


DR. JOSÉ JESÚS OBRADOR OLÁN

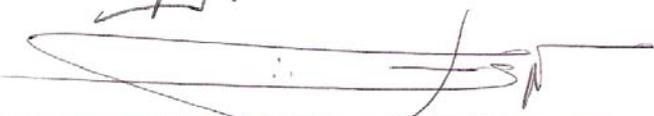
DIRECTOR


DR. EUGENIO CARRILLO ÁVILA

ASESOR


DR. JOSÉ FRANCISCO JUÁREZ LÓPEZ

ASESOR


DR. LORENZO ARMANDO ACEVES NAVARRO

H. CÁRDENAS TABASCO, NOVIEMBRE 2008

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme: vivir, creer en el amor, en la lealtad, en la justicia y en la familia; por hacerme participe del dolor ajeno, por no comer y beber en mi mesa sonriendo, cuando alguien muere por pan y agua.

Al CONACYT por el apoyo que recibí como becario para la realización de mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados, Campus-Tabasco, por haberme permitido realizar mis estudios de postgrado dentro de su programa de Producción Agroalimentaria en el Trópico, así como el apoyado económico recibido de \$6000.00 en la investigación de esta tesis.

Al Colegio de Postgraduados Campus-Campeche, por haberme permitido realizar el trabajo de investigación en sus instalaciones, así como el apoyo recibido por el alojamiento.

Al Dr. José Jesús Obrador Olán, por su empeño, dedicación, apoyo económico y consejo, que hicieron que mi formación académica, científica y humanitaria fuera mas completa.

Al Dr. Eugenio Carrillo Ávila, por compartir conocimientos, experiencias en el uso y manejo del agua; así como en la disposición de tiempo brindado en el análisis estadístico de los datos, como también el apoyo alimenticio brindado.

Al Dr. José Francisco Juárez López por su comentario contractivo, empeño, por compartir sus conocimientos, que hicieron posible la realización de este trabajo, así como el apoyo moral brindado desde la licenciatura.

Al Dr. Lorenzo Armando Aceves Navarro, por sus aportaciones, por compartir conocimientos, experiencias, así también le agradezco por compartir sus comentarios finos sobre la ciencia, y su punto holístico sobre el clima.

A la Dra Eustolia García López, por la aportación de sus comentarios, por la revisión ortográfica de este trabajo de investigación, así como la realización del índice temático.

Al Dr. David Jesús Palma López, por despertar en mi persona la inquietud de realizar una maestría en ciencias, así también le agradezco su apoyo moral.

Al Dr. Jesús Armando Mejía Núñez, por el apoyo económico brindado durante el primer año cursado en la maestría en Producción Agroalimentaria en el Trópico del Campus-Tabasco.

A los trabajadores del Campus-Campeche: Sr. Olegario, Mariano, Juan, y otros más.

A los compañeros de generación: Yazia Vanesa, Adriana, Lorena, Heyra, Ana Lilia, Gloria, Yasmín, Enrique, Marcelino, Héctor, Carlos Rubén, Rubén, Vladimiro y Jorge, por su amistad.

A mis amigas y compañera de profesión Vianey y Aurora por su cariño, apoyo moral y por compartir momento de felicidad con migo gracias.

A mi amigo y colega de profesión Vinicio, por haberme ayudado hacer el índice de esta tesis, y por sus comentarios constructivos.

Al Dr. Dr. Wilder Camacho Chiu, por su amistad, consejos, comentarios finos en estadística, por hacer su clase amena, llena de confianza y por aquel trago de vino.

DEDICATORIA

A MI HIJO

Roberto Carlos Rivera Palma

A MIS SOBRINOS

Dulce, Miriam, Fátima, Maria, Lucero, Denis y Livia
Paco, Tilo, Boliche, Martín

A MIS PADRES

Sr. Diógenes Rivera Morales
Sra, Miriam Hernández Ramos

A MIS HERMANOS

Nora, María, Claudia, Fabiola, Iliana, Diocelina, Merlín,
Nelson, Euler y Diógenes

CONTENIDO

LISTA DE CUADRO	i
LISTA DE FIGURAS	iii

CAPÍTULO I. Consideraciones Generales.

1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	2
1.2.1. OBJETIVOS.....	2
1.2.1.1. Objetivo general	2
1.2.1.2. Objetivos particulares.....	3
1.2.2. HIPÓTESIS.....	3
1.3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
1.3.1. PRODUCCIÓN DE ELOTE EN MÉXICO.....	3
1.3.2. NECESIDAD HÍDRICA DEL CULTIVO DE MAÍZ.....	5
1.3.3. IMPORTANCIA DE LA TEMPERATURA EN EL CULTIVO DE MAÍZ.....	6
1.3.4. IMPORTANCIA DE NUTRICIÓN DE NITRÓGENO (N), FÓSFORO (P) Y POTASIO (K) EN EL CULTIVO DE MAÍZ	7
1.3.4.1. Nitrógeno (N).....	7
1.3.4.2. Fósforo (P).....	8
1.3.4.3. Potasio (K).....	8
1.3.5. IMPORTANCIA DEL ESTADO DE DESARROLLO EN MAÍZ	9
1.3.6. MÉTODOS PARA ESTIMAR GRADOS DIAS DESARROLLO (GDD).....	11
1.3.7. MODELO SIMPLIFICADO PARA ESTIMAR DOSIS DE FERTILIZACIÓN.....	11
1.4. LITERATURA CITADA.....	13

CAPÍTULO II. La tensión de humedad en el suelo y la fertilización fosfatada sobre los componentes del rendimiento del maíz (Zea mays L.) híbrido elotero A-7573, en Campeche, México.

2.1. RESUMEN.....	18
2.2. INTRODUCCIÓN	18
2.3. MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.3.1. Establecimiento del experimento	20
2.3.2. Análisis del agua de riego y del suelo.....	20
2.3.3. Niveles de fertilización fosfórica	21
2.3.4. Factores en estudio	22
2.3.5. Tratamientos.....	22
2.3.6. Diseño experimental.....	22
2.3.7. Aplicación de los tratamientos	22
2.3.8. Variables evaluadas.....	23
2.3.9. Eficiencia del uso del agua.....	23
2.3.10. Análisis de varianza	24
2.3.11. Análisis de regresión	24
2.3.12. Labores culturales	24
2.3.13. Control de plagas.....	24
2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
2.4.1. Uso de la tensión de humedad para definir el momento de los riegos.....	24
2.4.2 Análisis de varianza del experimento.....	25
2.4.3. Análisis de regresión	27
2.4.4. Eficiencia en el uso del agua.....	32
2.5 CONCLUSIONES	33
2.6. LITERATURA CITADA.....	33

CAPÍTULO III. Calidad del maíz (Zea mays L.) híbrido elotero A-7573 como respuesta a la tensión de humedad al momento del riego y a la fertilización fosfatada en Campeche, México.

3.1. RESUMEN.....	35
3.2. INTRODUCCIÓN	35

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS	37
3.3.1. Establecimiento del experimento	37
3.3.2. Factores en estudio	38
3.3.3. Tratamientos.....	38
3.3.4. Diseño experimental.....	39
3.3.5. Aplicación de los tratamientos	39
3.3.6. Labores culturales	39
3.3.7. Control de plagas.....	39
3.3.8. Variables evaluadas.....	39
3.3.9. Eficiencia del uso del agua.....	40
3.3.10. Análisis estadístico.....	40
3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
3.4.1 Análisis de varianza del experimento.....	41
3.4.2. Comparación múltiple de medias.....	42
3.4.3. Análisis de regresión	45
3.4.4. Eficiencia en el uso del agua.....	50
3.5. CONCLUSIONES	51
3.6 LITERATURA CITADA.....	51

CAPÍTULO IV. Efecto de la tensión de humedad en el suelo sobre la fenología del maíz elotero (*Zea mays* L.) Híbrido A-7573, en el sur del Estado de Campeche.

4.1. RESUMEN.....	54
4.2. INTRODUCCIÓN	54
4.3 MATERIALES Y METODOS	55
4.3.1. Establecimiento del experimento	55
4.3.2. Factores en estudio	55
4.3.3. Tratamientos.....	56
4.3.4. Diseño experimental.....	56
4.3.5. Aplicación de los tratamientos	56
4.3.6. Labores culturales	57
4.3.7. Control de plagas.....	57

4.3.8. Etapas fenológicas evaluadas	57
4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
4.5. CONCLUSIONES	64
4.6. LITERATURA CITADA.....	64

CAPÍTULO V. Conclusiones y recomendaciones generales de la investigación sobre riego y fertilización fosfatada de maíz elotero Híbrido A-7573.

5.1. CONCLUSIONES	66
5.1.1. SOBRE LOS COMPONENTES DEL RENDIMIENTO	66
5.1.2. SOBRE LA CALIDAD.....	67
5.1.3. SOBRE LA FENOLOGÍA.....	68
5.2. RECOMENDACIONES GENERALES.....	68

LISTA DE CUADRO

Cuadro 1.1. Superficie sembrada de maíz para elote, producción, rendimiento, precio medio rural y valor de la producción (riego más temporal) en México.	4
Cuadro 1.2. Superficie sembrada de maíz para elote, producción, rendimiento, precio medio rural y valor de la producción en la modalidad de riego en México.	4
Cuadro 1.3. Principales Estados productores de maíz elotero (superficie sembrada) en México en el año 2004.	5
Cuadro 1.4. Etapas de desarrollo del cultivo de maíz.	9
Cuadro 1.5. Etapas de desarrollo de la planta de maíz (Hanway 1982).	10
Cuadro 2.1. Resultados del análisis químico del agua de riego.	20
Cuadro 2.2. Resultados del análisis químico del suelo de la parcela experimental.	21
Cuadro 2.3. Tratamientos evaluados	22
Cuadro 2.4. Niveles de significancia (del análisis de varianza) para las variables de respuesta evaluadas en el maíz híbrido elotero A-7573 cultivado bajo cuatro tensiones de humedad en el suelo y tres dosis de fósforo en el estado de Campeche.	26
Cuadro 2.5. Evaluación (Tukey, $p \leq 0.01$) del efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego y de la fertilización fosfatada en maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche.	26
Cuadro 2.6. Ecuaciones de regresión obtenidas para las variables de respuesta.	28
Cuadro 2.7. Número de riegos aplicados, número promedio de riegos, y lámina de agua aplicada en los tratamientos de tensión de humedad evaluados.	32
Cuadro 2.8. Eficiencia del uso del agua de riego (EUAr) y total (EUAt) para cada tratamiento de riego en el rendimiento de elote fresco (REF).	32
Cuadro 3.1. Tratamientos evaluados	38
Cuadro 3.2. Niveles de significancia observados en el análisis de varianza del experimento para las variables de respuesta evaluadas. Maíz híbrido	

elotero A-7573 cultivado bajo cuatro tensiones de humedad en el suelo y tres dosis de fósforo en el estado de Campeche.	41
Cuadro 3.3. Comparación múltiple de medias de las variables de respuesta. Efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego en maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche.	42
Cuadro 3.4. Comparación múltiple de medias de las variables de respuesta. Efecto de diferentes dosis de fósforo en maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche.	45
Cuadro 3.5. Ecuaciones de regresión obtenidas para las variables de respuesta.	46
Cuadro 4.2. Etapas fenológicas vegetativas (V) y reproductivas (R) de la planta de maíz.	57
Cuadro 4.3. Efecto de la tensión de humedad en el suelo sobre la duración del tiempo cronológico y fisiológico de las etapas fenológicas del maíz híbrido A-7573 en Campeche.	60
Cuadro 4.4. Modelos de desarrollo para el maíz híbrido A-7573 con diferentes tensiones de humedad en el suelo en el estado de Campeche.	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Evolución temporal de la tensión de humedad, usada para definir el momento del riego en las parcelas de los tratamientos de -55 y -80 kPa en el bloque tres, del 26 de mayo al 20 de junio de 2007.....	25
Figura 2.2. Efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego y la fertilización fosfatada sobre la altura de las plantas de maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche	29
Figura 2.3. Efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego y la fertilización fosfatada, sobre la longitud de elote (incluyendo las brácteas), en plantas de maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche.....	29
Figura 2.4. Efecto de la dosis de fertilización fosfatada y la tensión de humedad en el suelo sobre el peso fresco de elote (g) en maíz híbrido elotero A-7573.....	31
Figura 2.5. Efecto de la dosis de fertilización fosfatada y la tensión de humedad en el suelo sobre el rendimiento de elote fresco ($t\ ha^{-1}$) en maíz híbrido elotero A-7573.....	31
Figura 3.1. Efecto de la dosis de fertilización fosfatada y la tensión de humedad en el suelo sobre el largo del elote sin bráctea en plantas de maíz híbrido elotero A-7573.....	47
Figura 3.2. Efecto de la dosis de fertilización fosfatada y la tensión de humedad en el suelo sobre el diámetro del elote sin bráctea en plantas de maíz híbrido elotero A-7573.....	47
Figura 3.3. Efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego y la fertilización fosfatada sobre el peso del elote en plantas de maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche.....	48
Figura 3.4. Efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego y la fertilización fosfatada sobre el número de granos sin llenar en plantas de maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche.....	49

Figura 3.5. Efecto de la dosis de fertilización fosfatada y la tensión de humedad en el suelo sobre el rendimiento en elote fresco (t ha-1) en plantas de maíz híbrido elotero A-7573.....	50
Figura 4.1. Comportamiento de la temperatura máxima y mínima durante el periodo de realización del experimento.	59
Figura 4.2. Modelo fenológico del Híbrido A-7375 para los tratamientos de tensión de humedad en el suelo de -5 y -30 kPa.....	62
Figura 4.3. Modelo fenológico del Híbrido A-7375 para el tratamiento de tensión de humedad en el suelo de -55 kPa.	63
Figura 4.4. Modelo fenológico del Híbrido A-7375 para una tensión de humedad en el suelo de -80 kPa.....	63

CAPÍTULO I

Consideraciones Generales

Consideraciones Generales

1.1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de la producción mundial de maíz se utiliza como alimento para animales o como materia prima industrial, y sólo aproximadamente el 20% se destina al consumo humano. En México el patrón de consumo difiere al de los países industrializados, ya que 68% del maíz se utiliza directamente para la alimentación humana con un consumo *per cápita* de 127 kg año⁻¹ (Nadal y Wise, 2005), donde constituye el principal cultivo y abarca ocho millones de hectáreas. No obstante, Estados Unidos exporta a México alrededor de seis millones de toneladas (CIMMYT, 2004).

El maíz es ampliamente cultivado por su aportación nutrimental en la dieta de la población, consumiéndose principalmente como grano seco procesado. Otra forma de consumo es en estado fresco o elote, acerca del cual existe poca información que permita mejorar tanto la producción como la calidad del mismo (Hernández *et al.*, 2001). El cultivo de maíz para la producción de elote es de alto valor económico ya que, además del buen precio que alcanza, se obtienen beneficios adicionales al comercializar o utilizar el forraje verde generado para la alimentación animal.

En el estado de Campeche la demanda de elote en estado fresco durante todo el año no se satisface debido a los bajos rendimientos, cuyas principales causas son: el uso de variedades criollas de bajo rendimiento y susceptibles a plagas y enfermedades, así como de variedades mejoradas no aptas para la producción de elote, uso de densidades de población inadecuadas, bajas dosis de fertilización e ineficiente uso y manejo del agua de riego (Hernández *et al.*, 2001). Smith y Paliwal, (1996) mencionan que la baja productividad del maíz en los trópicos se debe a varios factores: los días cortos, un período de crecimiento breve, una baja intensidad de la radiación debida a la nubosidad, temperaturas nocturnas altas, estrés biótico y abiótico más severo y bajo uso de tecnología (insumos, riego, etc).

En la región Sur-Sureste de México (Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Chiapas, Oaxaca y Guerrero) más de un millón de hectáreas de tierras planas y de lomeríos cultivadas en condiciones de temporal, permanecen ociosas durante el periodo de secas (Turrent *et al.*, 2004).

La sequía afecta la producción agrícola en cerca del 60% de las tierras de los trópicos (Sánchez *et al.*, 1977). Reduce los rendimientos del maíz en cerca de 15% anualmente en las tierras bajas tropicales y subtropicales, llegando a causar pérdidas estimadas en 16 millones de toneladas de grano (Edmeades *et al.*, 1992).

En Campeche, en el ciclo primavera–verano, existe déficit de humedad debido a la variabilidad natural en la cantidad y distribución de la lluvia, lo que significa que el estrés por sequía puede ocurrir en cualquier momento del ciclo del cultivo, limitando el desarrollo y crecimiento de éste y dando lugar a bajos rendimientos por unidad de superficie (Norman *et al.*, 1995). A pesar de la importancia que tiene el uso de la tecnología del riego para la producción de maíz, existe poca investigación que refuerce la aplicación correcta de riegos de auxilio durante las fases críticas de floración y fructificación, donde se sabe que el déficit hídrico reduce significativamente la formación de granos, por el aborto de óvulos polinizados (Zinselmeier *et al.*, 1995). Así también, existe poca información referida a la fertilización edáfica, especialmente de fósforo, durante el ciclo productivo del maíz, y sobre los periodos máximos de absorción. Los estudios fenológicos de este cultivo en el estado de Campeche son casi inexistentes, aunque son importantes debido a que predicen los procesos biológicos (anthesis, aparición de los estigmas) y facilitan la planeación de actividades agronómicas y de comercialización del elote. Por la importancia social, cultural y económica que representa el cultivo del maíz elotero en el sureste mexicano, se plantea la presente investigación, cuyos objetivos e hipótesis son los siguientes:

1.2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

1.2.1. OBJETIVOS

1.2.1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de diferentes niveles de potencial hídrico, probar dosis de fertilización y conocer la relación de ambos factores respecto a variables del crecimiento y desarrollo del maíz elotero (*Zea mays* L.) híbrido A-7573, sobre un suelo Vertisol.

1.2.1.2. Objetivos particulares

- I. Evaluar el efecto de cuatro diferentes niveles de tensión de humedad en el suelo y tres dosis de fertilización fosfatada sobre los componentes del rendimiento en maíz (*Zea mays* L.) híbrido elotero A-7573.
- II. Evaluar el efecto de diferentes dosis de fertilización fosfatada y tensiones de humedad en el suelo al momento del riego sobre la calidad del maíz elotero híbrido A-7573.
- III. Estudiar el efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego sobre el comportamiento fenológico del maíz elotero híbrido A-7573 en condiciones de riego controlado.

1.2.2. HIPÓTESIS

- 1) El rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) híbrido elotero A-7573 se incrementa conforme disminuye la tensión de humedad en el suelo y aumentan las dosis de fertilización fosfatada.
- 2) La calidad del maíz (*Zea mays* L.) híbrido elotero A-7573, se incrementa conforme disminuye la tensión de humedad en el suelo y aumentan las dosis de fertilización fosfatada.
- 3) La tensión de humedad en el suelo afectan el comportamiento fenológico del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) híbrido elotero A-7573.

1.3. REVISIÓN DE LITERATURA

1.3.1. PRODUCCIÓN DE ELOTE EN MÉXICO

En el Cuadro 1.1 se presenta la superficie sembrada, la producción, el rendimiento, el precio medio rural y el valor de la producción del maíz elotero en riego más temporal de los últimos siete años en México. Se observa un incremento de 55.45% en la superficie sembrada en el año 2006 con respecto al año 2000, que el rendimiento promedio en los últimos seis años es de 10.75 t ha⁻¹, con un precio promedio rural de \$1,233.71 t. El valor promedio de la producción para el año 2006 fue de \$963,188.70 (SIAP-SAGARPA, 2007). En el Cuadro 1.2 se muestran los resultados parciales del mismo periodo para la modalidad de riego.

Cuadro 1.1. Superficie sembrada de maíz para elote, producción, rendimiento, precio medio rural y valor de la producción (riego más temporal) en México.

Años	Superficie sembrada(ha)	Producción (t)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Precio medio rural (\$/t)	Valor Producción (Miles de Pesos)
2000	31,260.94	342,634.69	11.18	1,005.18	344,408.56
2001	36,970.77	461,698.33	12.54	1,063.85	491,175.66
2002	44,821.18	522,849.87	11.7	1,171.07	612,294.97
2003	44,828.55	503,407.17	11.65	1,227.99	618,180.16
2004	69,237.42	589,615.46	9.77	1,287.11	758,902.09
2005	72,294.12	627,278.97	8.95	1,394.88	874,977.80
2006	68,576.48	648,238.42	9.48	1,485.86	963,188.70

Fuente: SIAP-SAGARPA, 2007.

Cuadro 1.2. Superficie sembrada de maíz para elote, producción, rendimiento, precio medio rural y valor de la producción en la modalidad de riego en México.

Años	Superficie sembrada(ha)	Producción (t)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Precio medio rural (\$/t)	Valor Producción (Miles de Pesos)
2000	28,044.89	307,508.34	11.21	991.13	304,780.24
2001	34,426.27	432,680.83	12.62	1,047.99	453,446.77
2002	42,038.18	496,732.67	11.84	1,162.67	577,534.02
2003	42,614.55	483,848.37	11.79	1,215.88	588,302.75
2004	45,124.41	530,185.78	12.06	1,278.80	678,002.85
2005	44,566.12	550,439.91	12.36	1,238.45	681,692.93
2006	43,537.48	548,624.51	12.62	1,269.43	696,440.27

Fuente: SIAP-SAGARPA, 2007.

El rendimiento promedio del maíz elotero en los últimos siete años en su modalidad de riego es de 12.07 t ha⁻¹, en tanto que para la modalidad temporal fue de 7.35 t ha⁻¹. Existe una mayor variación en los rendimientos en la modalidad temporal, lo cual se debe principalmente a la variación de las lluvias y fertilización. (SIAP-SAGARPA, 2007).

En el Cuadro 1.3 se presentan los principales estados productores de maíz elotero en México para el año 2004; el estado de Campeche ocupó el décimo octavo lugar en superficie sembrada (203 ha) y el vigésimo segundo por rendimiento (3.64 t ha⁻¹), superando en este apartado sólo a Quintana Roo y Baja California Sur, los bajos rendimientos en esta entidad se deben a que más

del 90% del maíz cultivado fue de temporal y una gran parte de éste fue establecido en suelo pocos profundos, deficientes en fósforo (SAGARPA, 2007).

Cuadro 1.3. Principales Estados productores de maíz elotero (superficie sembrada) en México en el año 2004.

Posición (superficie sembrada)	Estados	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (t)	Producción (t)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Precio medio rural	Valor de la producción (Miles de Pesos)
1	Quintana Roo	21,042.00	13,300.00	29,564.00	2.22	1,336.30	39,506.40
2	Puebla	14,731.00	14,201.00	135,175.00	9.52	988.44	133,612.38
3	San Luis Potosí	11,056.00	11,056.00	142,028.50	12.85	887.47	126,045.46
4	Morelos	7,179.50	7,179.50	71,042.80	9.9	2,589.60	183,972.40
5	Jalisco	3,953.00	3,953.00	61,775.50	15.63	1,059.28	65,437.27
6	Michoacán	1,923.42	1,923.41	28,321.37	14.72	988.83	28,005.03
7	Colima	1,641.50	1,641.50	26,221.50	15.97	854.96	22,418.40
8	México	1,405.00	1,397.00	13,000.43	9.31	2,946.06	38,300.02
9	Guanajuato	1,351.00	1,351.00	26,960.00	19.96	778.19	20,980.00
10	Sonora	1,069.00	474	4,677.00	9.87	3,007.37	14,065.45
18	Campeche	203	203	738.5	3.64	3,500.00	2,584.75

1.3.2. NECESIDAD HÍDRICA DEL CULTIVO DE MAÍZ

El maíz es un usuario eficiente del agua en cuanto a la producción total de materia seca y, entre los cereales, es potencialmente el cultivo de granos de mayor rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1979). El consumo hídrico del maíz depende de factores como la duración del ciclo de cultivo, el clima, la disponibilidad de agua, características hidrodinámicas del suelo y prácticas de manejo del sistema suelo-planta. Al respecto Llanos (1984) menciona que las necesidades de agua consideradas normales para el cultivo son de aproximadamente 600 mm, aunque estas varían dependiendo del rendimiento máximo alcanzado en cada región.

Las sequías cercanas a la época de floración tienen un efecto multiplicador sobre el rendimiento, aparentemente porque reducen la formación de reservas. Por otra parte, el número de granos por planta puede reducirse a causa de dificultades en la polinización o porque los óvulos fertilizados detienen su crecimiento (Westgate, 1994). El crecimiento de los estambres es muy sensible al

contenido de agua de la planta y su emergencia se demora con la sequía; la ejerción de la panoja y el derrame del polen son menos afectados por el bajo contenido de agua de la planta, aunque los últimos estambres que emergen pueden no participar en la polinización (Westgate, 1994).

Si la sequía ocurre durante el llenado del grano, la velocidad y la duración del período de llenado decrecen; esto ocurre a causa de una reducción en la fotosíntesis y una aceleración de la senescencia foliar. El estrés del llenado del grano por lo general ocurre cuando las lluvias terminan temprano, en comparación con otros años; las variedades de madurez temprana pueden evitar tal estrés pero a costa de una pérdida de potencial de rendimiento en los años de buenas lluvias. El impacto del estrés durante el período de llenado del grano puede influir de diferente manera en el decremento del rendimiento dependiendo de la intensidad de la sequía y de los otros factores ambientales, resultando, de manera general en un llenado parcial del grano, acompañado a menudo por acame. El acame ocurre porque muchas de las reservas de carbohidratos del tallo se movilizan hacia el grano cuando la tasa fotosintética es limitada por el estrés de humedad. Las deficiencias de humedad durante la diferenciación e inicio de crecimiento de la mazorca, provocan una reducción del rendimiento del grano de 23 a 34%, debida a la disminución del número de granos por mazorca (de 15 a 26%). Asimismo, una reducción de la evapotranspiración del 13% durante el llenado de grano (85 a 120 días) provocó una disminución del peso medio de grano de 17% (Reta y Faz, 1999).

1.3.3. IMPORTANCIA DE LA TEMPERATURA EN EL CULTIVO DE MAÍZ

La temperatura es considerada como la variable más importante en el control del desarrollo y crecimiento de las plantas (Abrami, 1972) siendo el meristemo apical de la planta de maíz el sitio de percepción de la temperatura (Vincent, 1989; Watts, 1973). La duración del periodo de siembra a emergencia depende principalmente de la temperatura del suelo (Cutforth y Shaykewich, 1989). La respuesta de la planta de maíz a la emergencia varía bajo condiciones de temperaturas frías (16/6°C) del día y de la noche, durando hasta 16 días a emergencia, mientras que bajo condiciones de alta temperatura (30/30°C) tarda solamente tres días (Warrington y Kanemasu, 1983a).

Otro periodo importante en el crecimiento y desarrollo del maíz es el tiempo de la siembra a la iniciación de la espiga y la antesis, en las cuales la temperatura puede afectar de tres maneras; a) las temperaturas frías afectan la duración del periodo de la siembra a la floración, efecto conocido como vernalización, b) debido a la amplia gama de temperaturas, el índice de progreso hacia la floración se incrementa con el aumento de la temperatura óptima, a la cual la floración es más rápida y c) existe un umbral en el cual la floración se retrasa progresivamente a temperaturas más cálidas (Summerfield *et al.*, 1991). La emisión de los estigmas puede retrasarse por temperaturas muy altas (Hunter *et al.*, 1974), o bajas (Wilson *et al.*, 1995). Warrington y Kanemasu (1983) han encontrado que la iniciación floral en maíz es rápida (17 días o menos) con temperaturas cálidas ($> 23^{\circ}\text{C}$), mientras que a temperaturas bajas ($< 15^{\circ}\text{C}$), las plantas tardan 40 días.

Crasta y Cox (1996), afirman que temperaturas menores de 14°C reducen la acumulación de materia seca en maíz durante el intervalo de crecimiento comprendido entre la emergencia y estado de ocho hojas. Cuando las temperaturas varían de 15 a 30°C , el índice de aparición foliar se incrementa aproximadamente al doble, por lo que se aumenta el promedio en el número de hojas con el rango de temperatura diurna (Coligado y Brown, 1975).

1.3.4. IMPORTANCIA DE NUTRICIÓN DE NITRÓGENO (N), FÓSFORO (P) Y POTASIO (K) EN EL CULTIVO DE MAÍZ

1.3.4.1. Nitrógeno (N)

Según Raja (1971), el N es un elemento esencial en la bioquímica de la planta porque es parte de un gran número de compuestos orgánicos indispensables para el crecimiento y desarrollo, tales como: a) proteínas, b) aminoácidos, c) clorofila, d) ácido nucleicos, e) hormonas y vitaminas, f) alcaloides, g) coenzimas y h) pared celular.

El N es importante en el cultivo de maíz porque, además de todas las funciones bioquímicas y fisiológicas comunes de este elemento, afecta su desarrollo foliar, retarda la floración y maduración de los granos, regula el crecimiento de la planta, influye en la formación de grano y además interviene en la sanidad, peso y volumen de la planta (Reyes, 1990). La fertilización con N incrementa el porcentaje de proteínas en los granos, específicamente cuando existen condiciones ambientales óptimas (Deckard *et al.*, 1984) la absorción de N ocurre a tasas que dependen del estado vegetativo de la planta, durante la etapa inicial del crecimiento la absorción

de N se hace a ritmo lento y cuando se aproxima el momento de la floración la absorción de N crece rápidamente (Llanos, 1984).

1.3.4.2. Fósforo (P)

El P, es un elemento que tiene importancia vital en la división celular, la respiración, la fotosíntesis y la acumulación de energía, su presencia es determinante en la germinación de las semillas, en el metabolismo de las plántulas, en la maduración del fruto y la semilla, y en el desarrollo radical. La falta de este nutrimento en las plantas de maíz trae como consecuencia: a) crecimiento y desarrollo lento de la planta, b) maduración tardía de la misma, retraso de floración y fructificación, c) baja producción de granos (en peso) y reducción de su tamaño, lo que hace que las mazorca muestren baja productividad (Medina 1977; Reyes, 1990). Por su parte Dosskey *et al.* (1993), indican que una nutrición inadecuada de P contribuye al estrés hídrico, ya que dicho elemento estimula los procesos fisiológicos que mejoran la situación hídrica de la planta, el potencial de agua y la condición estomatal.

Al respecto Ali *et al.* (2002), estudiaron el efecto de tres dosis de nitrógeno (N): 0, 90 y 150 kg ha⁻¹, y cuatro de fósforo (P): 0, 60, 90 y 120 kg ha⁻¹ sobre los componentes del rendimiento de maíz, encontrando los mayores valores en la altura de planta (289.99 cm), número de mazorcas por planta (1.73), número de granos por mazorca (344), peso seco de mil granos (320.91g) y cosecha de grano (3841.35 kg ha⁻¹), con las dosis de 150 kg N ha⁻¹ y 90 kg P ha⁻¹. Arain *et al.* (1989) reportan que la altura de la planta y el número de granos por mazorca incrementan con 100 kg N ha⁻¹ y 60 kg P₂O₅ ha⁻¹, además, conforme incrementa el nitrógeno decrece el número de granos por mazorca.

1.3.4.3. Potasio (K)

El K ejerce influencia, ante todo, sobre la intensificación de la hidratación de los coloides del citoplasma, elevando su grado de dispersión, lo que ayuda a la planta a retener mejor el agua y soportar las sequías temporales (Wong *et al.*, 1983). Las plantas de maíz con contenidos óptimos de K se caracterizan, en general, por la temprana aparición de los estigmas, una madurez uniforme, resistencia del tallo y un alto peso del grano (Usherwood, 1985). Sin embargo, bajo condiciones severas de estrés de K la planta presenta las siguientes características: a) baja emergencia de plántulas, b) espigado flexible, c) aborto de semillas, y d) bajo peso de grano y, en general, problemas de supervivencia, lo que se refleja en una disminución del rendimiento.

1.3.5. IMPORTANCIA DEL ESTADO DE DESARROLLO EN MAÍZ

El conocimiento del ciclo fenológico (Cuadro 1.4) es de suma importancia en diversos procesos prácticos de la agronomía (épocas de siembra, escalonamiento de fechas de cosecha, lineamiento de actividades agrícolas y programa de mejoramiento) para alcanzar los máximos rendimientos a menor costo económico y ambiental por ello, su descripción en maíz es importante, habiendo sido definido en término de días después de la siembra (Elías y Castellvi 1996).

Cuadro 1.4. Etapas de desarrollo del cultivo de maíz.

Etapas	Descripción
Siembra	Es el momento en que es depositada la semilla en el campo y a partir de la cual inicia el conteo a diferentes etapas de desarrollo (Edmeades <i>et al.</i> , 1998)
Emergencia	El tiempo que ocupa la semilla de maíz para que el coleóptilo se haga visible de la capa de suelo (Edmeades <i>et al.</i> , 1998).
Iniciación de las hojas	La determinación de la iniciación de una hoja específica, o el tiempo entre la iniciación de las hojas sucesivas (Abbe y Phinney, 1951).
Iniciación de la espiga	Ocurre cuando la iniciación de la hoja ha sido completada y marca el crecimiento reproductivo. Esta etapa se caracteriza por el alargamiento apical, seguido por la aparición de hileras iniciales de la espiga (Siemer <i>et al.</i> , 1969). Stevens <i>et al.</i> (1986) afirman que la iniciación ha ocurrido cuando la longitud del meristemo apical excede los 0.4 mm, pero otros han usado una longitud de 0.5- 1.00 mm (Russell y Stuber, 1983; 1984).
Iniciación de la mazorca	En esta etapa de desarrollo ocurre una sucesión basipétala del meristemo en las axilas de cada hoja, iniciando cerca de la cuarta a séptima hoja de la parte superior de la planta, se considera que la iniciación ha ocurrido cuando la longitud de este meristemo lateral excede 0.5 mm (Siemer <i>et al.</i> , 1969). Esta yema lateral puede transformarse sea en mazorca o cuando está cerca de la base de la planta, en macollo (Edmeades y Daynerd, 1979; Jacobs y Pearson, 1992).
Emergencia de una hoja específica	La iniciación de una hoja comienza antes que la aurícula y la lígula se hagan visibles. Durante el desarrollo foliar la parte apical de la hoja puede observarse como emergencia en el centro de la planta o cogollo. Así las hojas continúan apareciendo y madurando desde la etapa de emergencia de la planta hasta antes de la antesis. Si el número de hojas finales de una variedad en un determinado ambiente es conocido, entonces la aparición de una hoja específica puede ser una importante medida de progreso hacia la floración. El tiempo entre la aparición de hojas sucesivas es una medición útil del índice de desarrollo (Jacobs y Pearson, 1992).
Emergencia de la espiga	Se caracteriza por la aparición de la punta de la espiga, cuando es vista desde una posición estándar (usualmente la parte superior del cogollo) (Jonson y Tanner, 1972).
Antesis	Ocurre cuando las primeras anteras son visibles en la emergencia de la espiga, 5 a 10 días después de que la espiga ha emergido; la diseminación del polen continúa 5 – 10 días después. Esta etapa es considerada como uno de los estados mas definidos en comparación con la emergencia de la espiga, debido a que es menos dependiente de la posición en la cual la planta es visualizada (Jonson y Tanner, 1972).
Aparición de los estigmas	La emergencia de los estigmas continúa por varios días después de que el primer estigma es visible en la parte superior del jilote. Los estigmas de segundo o terceros jilotes son también fácilmente observados en el desarrollo de eventos (Jonson y Tanner, 1972).
Llenado de granos	Después de la polinización el peso seco del grano se incrementa con un índice exponencial bajo; antes de incrementarse linealmente con el tiempo. La medición periódica del peso seco de los granos durante su fase inicial puede aproximadamente identificar la longitud del periodo pasado y el inicio del periodo lineal del llenado del grano (Jonson y Tanner, 1972).
Grado de madurez de leche	Este estado puede ser monitoreado por la desaparición de la línea de leche del grano, lo cual puede ser observado visualmente entre las matrices sólidas y líquidas en el desarrollo del grano (Afuakwa y Crookston, 1984).
Madurez fisiológica	Ocurre cuando cesa el crecimiento del peso seco del grano, lo cual coincide con la formación de la capa negra visible en la región placentar en la base del grano (Daynard y Duncan, 1969).

La fenología es el estudio de los fenómenos periódicos (emergencia de cultivos, brotación de frutales, floración, fructificación, madurez, etc.) de las plantas y su relación con las condiciones ambientales como luz, temperatura y humedad (Torres, 1995)

Por otro lado, Hanway (1982) divide el desarrollo del maíz en etapas vegetativas (V) y etapas reproductivas (R) como se muestra en el Cuadro 1.5.

Cuadro 1.5. Etapas de desarrollo de la planta de maíz (Hanway 1982).

Vegetativos “V”	Reproductivos “R”
VE. Etapa de emergencia	R1. Brotación de estigma en jilote
V1 Primera hoja ligulada	R2. Grano en perlita
V2 Segunda hoja ligulada	R3. Grano lechoso
V3 Tercera hoja ligulada	R4. Grano mañoso
V_n Enésima hoja ligulada	R5. Grano dentado
VT Dehiscencia de polen en espiga	R6. Madurez fisiológica

Las subdivisiones de las etapas con la letra V están diseñadas numéricamente como V1, V2, V3, hasta V_n, donde n representa la etapa de la última hoja ligulada antes de VT para el híbrido considerado. Las primera y últimas etapas son señaladas VE (emergencia) y VT (dehiscencia de polen en la espiga). Las seis subdivisiones de las etapas reproductivas son señaladas numéricamente con los nombres comunes. Cada etapa vegetativa de las hojas es definida de acuerdo a la hoja más alta en la cual la lígula es visible. La primera parte de la lígula es visible cuando en su parte posterior aparece como una línea decolorada entre la base foliar y la vaina. La forma ovalada característica de la primera hoja es un punto de referencia para contar las hojas hacia arriba hasta la hoja con la lígula visible más alta. El sistema propuesto por Hanway identifica con precisión las etapas de una planta de maíz. Sin embargo, no todas las plantas en un campo determinado presentan la misma etapa simultáneamente; cada etapa vegetativa o reproductiva específica se define cuando ocurre en el 50% o más de la plantas en campo.

1.3.6. MÉTODOS PARA ESTIMAR GRADOS DÍAS DESARROLLO (GDD)

Para predecir las etapas fenológicas del maíz se utilizan los grados días desarrollo GDD como unidades térmicas; estos se definen como la suma de calor necesario para generar una respuesta de desarrollo de la planta, la cual considera una respuesta lineal entre el número de la etapa de desarrollo y los GDD acumulados. Los GDD se pueden estimar a partir de la temperatura promedio diaria y/o a temperatura máxima, menos una constante de temperatura a la cual se considera que la planta detiene su desarrollo. Su cálculo se basa en la relación que existe entre la temperatura y la tasa de desarrollo de la planta. Arnold (1971), propone los siguientes métodos para su estimación:

Método estándar de grados días

$$GDD = \Sigma [(T_{\max} + T_{\min})/2] - T_{\text{base}}$$

Donde: $[(T_{\max} + T_{\min})/2]$ es el promedio de la temperatura diaria y T_{base} es la temperatura umbral mínima para el cultivo.

Método de temperatura máxima

$$GDD = \Sigma (T_{\max} - T_{\text{base}})$$

Método reducido

Donde: Si: $T_{\max} \leq T_{\text{óptima}}$; entonces se calcula:

$$GDD = \Sigma (T_{\max} - T_{\text{base}})$$

Si: $T_{\max} > T_{\text{óptima}}$; Se calcula:

$$GDD = \Sigma [(T_{\text{óptima}} - (T_{\max} - T_{\text{óptima}})) - T_{\text{base}}]$$

Donde: $T_{\text{óptima}}$: es la temperatura a la cual la planta alcanza su máximo desarrollo.

1.3.7. MODELO SIMPLIFICADO PARA ESTIMAR DOSIS DE FERTILIZACIÓN

El modelo integral simplificado que se emplea en el presente trabajo es una herramienta que sirve para contestar las siguientes interrogantes básicas: a) cuánto fertilizante debe ser agregado a un suelo para obtener determinado rendimiento de un cultivo, en condiciones de clima y disponibilidad de agua específicas; b) cuánto nutriente es abastecido por el suelo; y c) cuál es la magnitud de la recuperación del nutriente de un fertilizante por cultivo. Será posible responder a

dichas preguntas si se cuenta con información experiencias de campo y análisis químicos de suelo y plantas (Driessen, 1986).

Los modelos simplificados se han validado con experimentación de campo tanto en Chile (Rodríguez, 1990) como en México (Galvis, 1990; Obrador, 1994) mostrando un valor predictivo promisorio. Ninguno de ellos ha sido usado en forma global, aunque varios de sus parámetros se utilizan para establecer las recomendaciones de fertilización (Rodríguez, 1990). La cantidad de fertilizante a agregar está en función de la demanda del nutrimento por el cultivo, del suministro de éste por el suelo y de la eficiencia de la fertilización.

La fórmula que relaciona estos parámetros es la siguiente:

$$DF = \frac{DC - SS}{EF}$$

Donde: DF = Dosis de fertilización; DC = Demanda del cultivo; SS = Suministro del suelo y EF = Eficiencia del fertilizante.

Se entiende por demanda de un cultivo la cantidad de un nutrimento necesaria para alcanzar cierta productividad. La productividad que realmente interesa es la máxima que se puede alcanzar en un lugar determinado, con técnicas agronómicas accesibles y económicas. La determinación simplificada de la demanda máxima de nutrimentos de un cultivo precisa del conocimiento de las magnitudes de tres parámetros: rendimiento máximo alcanzable, índice de cosecha y requerimiento interno (Rodríguez, 1987).

El suministro es la proporción del nutrimento disponible en el suelo que la planta realmente puede utilizar. Para el caso de P, la fracción disponible se encuentra constituida por el P en solución, la cual está en equilibrio directo con el P lábil y éste a su vez con el P no lábil (Barrow y Shaw, 1976). En el caso del N la fracción disponible tiene su origen en la mineralización del N orgánico del suelo, que está constituido por los residuos incorporados al suelo y los compuestos estabilizados por la protección física y química de las arcillas en el suelo (Van Veen *et al.*, 1985). La estimación del suministro de K del suelo se basa en el contenido del K intercambiable (K_i) determinado por el análisis del suelo. Sin embargo, el K_i es sólo un índice de K lábil o del suministro de K del suelo. Para conocer el suministro real de K a partir del K_i se debe relacionar la absorción de K de los diferentes cultivos con el contenido de K_i del suelo (Rodríguez y Galvis, 1989). Éste dependerá de la eficiencia del cultivo y la naturaleza y cantidad de arcillas presentes en el suelo.

Yagodin *et al.*, (1986) señalan que la eficiencia de la fertilización indica la proporción del fertilizante agregado que es recuperado por el cultivo, o sea que corresponda a la fracción de éste que pudo ser absorbido por la planta, puede variar sustancialmente no sólo debido a las peculiaridades biológicas de los diferentes cultivos, sino también como resultado de la alteración de los factores circundantes como la fertilidad del suelo y su acidez, condiciones de la temporada y nivel de manejo.

1.4. LITERATURA CITADA

1. Abbe, E.C. and Phinney, B.O. 1951. The growth of the shoot apex in maize external features. *Amer. J. Bot.* 38: 737-744.
2. Abrami G. 1972. Optimun mean temperature for growth calculate by a new method of summation. *Ecology*, 53: 893-900.
3. Ali, J., Bakht, J., Shafí, M., Khan, S y Shah, W.A. 2002. Effect of various levels of N y P on yield and yield components of maize. *Pakistan Journal of Agronomy* 1(1):12-14.
4. Arain, A.S., Alam, S.M y Tuno, A.K. 1989. Performance of maize genotypes under varying NP fertilizer environments. *Sarhad J. Agric.* 5:623-626.
5. Afuakwa, J. J and Crookston, R. K. 1984. Using the kernel milk line to visually monitor grain maturity in maize. *Crop Sci.* 24: 687-691.
6. Arnold, C.Y. 1971. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Proc. Amer. Hort. Sci.* 74: 430-445.
7. Barrow, N.J. y Shaw. T.C. 1976. Sodium bicarbonate an extractant for soil phosphate. I. Separation of the factors affecting the amount of phosphate displaced from soil from those affecting secondary adsorption. *Geoderma* 16:91-107.
8. CIMMYT (Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y Trigo) 2004. Draft Consensus Document on the Biology of *Zea mays* subsp. *mays* (maize). OECD Program of Work on Harmonization of Regulatory Over-sight in Biotechnology.
9. Coligado, M.C and Brown, D.M. 1975. Response of corn (*Zea mays* L.) in the pre-tassel initiation period to temperature and photoperiod. *Agric. Meteorol.* 14: 357-367.
10. Cutforth, H.W. and Shaykewich, C. F.1989. Relationship of development rate of corn from planting to silking to air and soil temperature and to accumulated thermal units in a prairie environmental. *Can. J. Plant Sci.* 69:121-132.

11. Crasta, O.R. and Cox, W.J. 1996. Temperature and soil water effects on maize growth, development yield, and forage quality. *Crop Sci.* 36: 314-348.
12. Daynard, T.B. and Duncan, W.G. 1969. The black layer and grain maturity in corn. *Crop Sci.* 9: 473-476.
13. Deckard, E. L.; Tsai, C.Y. and Tucker, T.C. 1984. Effect of nitrogen nutrition on quality of agronomic crops, pp 601-615. In R.D. Hauck (Ed). *Nitrogen in crop production.* American Society of Agronomy. Madison, Wis.
14. Dosskey, M.G.; Boersma, L. and Linderman, R.G. 1993. Effect of phosphorous fertilization on water stress in Douglas fir seedlings during soil drying. *Plant and Soil* 150: 33-39.
15. Doorenbos, J. y Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. FAO. Irrigation and Drainage Paper 33. Rome, FAO.
16. Driessen, P.M. 1986. Nutrient demand and fertilizar requirements. In: *Modelling of agricultural production-water, soil and crops.* H. van Keulen and J. Wolf (Eds). Wageningen: PUDOC, pp 182-200
17. Edmeades, G.O. and Daynerd, T.B. 1979. The development of plant-to-plant variability in mize at different planting densities. *Can. J. Plant Sci.* 59:561-576.
18. Edmeades, G.O.; Lafitte, H. R and Chapman, S.C. 1998. Predicting the phenology of tropical maize. The effects of photoperiod and temperature. CIMMYT. Mexico.
19. Edmeades, G.O., Bolaños, J. & Lafitte, H.R. 1992. Progress in breeding for drought tolerance in maize. *In* D. Wilkinson, ed. Proc. 47th Ann. Corn and Sorghum Ind. Res. Conf., Chicago, Illinois, Dec. 1992, p. 93-111. Washington, DC, ASTA.
20. Elías, C.F y Castellvi, S. F. 1996. Agrometeorología. Ed. Mundi-Prensa. Pp 317-323.
21. Galvis S., A. 1990. Validación de las normas de fertilización de nitrógeno y fósforo estimadas con un modelo simplificado para maíz, con las dosis obtenidas en la experimentación en campo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
22. Hanway, J.H. 1982. How a corn plant develops. Special Report no 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. Ames, Iowa, E. U. A. 21 Pag.

23. Hernández, A.J.A.; Ramiro, C.A.; Maya, H.V.; Chaverría, C.J y Martínez, G.M. 2001. El cultivo de maíz para elote en la zona media de San Luis Potosí. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro de Investigación Regional del Noreste (CIRN) Campo Experimental las Palmas. Folleto Núm. 26 Pp 5-13.
24. Hunter, R.B.; Hunt, L.A. and Kannenberg, L.W. 1974. Photoperiod and temperature effects on corn. *Can J. Sci.* 54: 71-78.
25. Jacobs, B.C and Pearson, C.J. 1992. Pre-flowering growth and development of the inflorescences of maize. I. Primordia production and apical dome Volume. I. *Exp. Bot.* 43:557-563.
26. Jonson, D.R and Tanner, J.W. 1972. Calculation of the rate and duration of grain filling in corn. (*Zea mays* L.) *Crop Sci.*12: 485-486.
27. Llanos, M.C. 1984. El maíz, su cultivo y aprovechamiento. Ediciones Mundiprensa, Madrid, España.
28. Medina, E. 1977. Introducción a la ecofisiología vegetal. OEA, Washington, D.C.
29. Nadal, A. y T.A. Wise. 2005. Los costos ambientales de la liberalización agrícola: el comercio de maíz entre México y Estados Unidos en el marco del NAFTA. In: Blanco, H., L. Togueiro de A. y K.P. Gallagher (editores): *Globalización y Medio Ambiente, Lecciones desde las Américas*. RIDES-GDAE. Santiago, Chile. pp. 49-92
30. Norman, M.J.T., Pearson, C.J. & Searle, P.G.E. 1995. *The ecology of tropical food crops*. New York, NY, USA, Cambridge University Press. 430 pp.
31. Raja, M.E. 1971. Nitrogen and potasium fertilization of corn as related to grain yield and leaf composition. Thesis. Departament of Soil Science, North Carolina State University, Raleigh, NC.
32. Obrador O., J.J. 1991. Dinámica del fósforo en unidades de suelos del estado de Tabasco. Tesis Profesional. Universidad Veracruzana. Orizaba, Veracruz, México.
33. Reta, S.D.G y Faz, C.R. 1999. Respuesta del maíz a diferentes niveles de humedad en el suelo. I. Rendimiento de grano y sus componentes. *Terra*. Vol. 17. N0 004.Pp 309-316
34. Reyes, C.P. 1990. El maíz y su cultivo. AGT Editor, México, D. F.
35. Rodríguez S., J. 1987. Desarrollo de normas de fertilización para el cultivo de maíz y la cebada en el estado de Tlaxcala. Colegio de Postgraduado Montecillo, México.

36. Rodríguez S., J y Galvis, A. 1989. Suministro de potasio en los suelos del país. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
37. Rodriguez, S., J. 1990. Fertilización de cultivos. Un método racional. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
38. Russell, W.K. and Stuber, C.W. 1983. Effects of photoperiod and temperatures on the duration on vegetative growth in maize. *Crop Sci.* 23: 847-850.
39. Russell, W.K and Stuber, C.W. 1984. Predicition of tassel initiation in corn. *Crop Sci.* 24: 507-510.
40. Sánchez, P.A., Nicholaidis, J.J., III & Couto, W. 1977. Physical and chemical constraints to food production in the tropics. In G. Bixler & L.W. Shenilt, eds. *Chemistry and world food supplies: the new frontiers, CHEMRAWN II*, p. 89-105. Los Baños, Philippines, IRRI.
41. SAGARPA. 2007. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. In: <http://www.sagarpa.gob.mx>.
42. Siemer, E.G.; Leng, E.R and Bonnett, O.T. 1969. Timing and correlation of major developmental events in maize (*Zea mays* L.) *Agron. J.* 61:14-17.
43. SIAP-SAGARPA 2007. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera-Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. Estadística Básica. Anuario 2006. www.siap.gob.mx.
44. Summerfield, R.J.; Roberts, E.R.; Ellis, R.E and Lawn, R.J. 1991. Towards the reliable prediction of time to flowering in six annual crops. I. The development of simple models for fluctuating field environments. *Expl. Agric.* 27:11-31.
45. Smith, M.E. y Paliwal, R.L. 1996. Contributions of genetic resources and biotechnology to sustainable productivity increases in maize. In: K. Watanabe & E. Pehu, eds. *Plant biotechnology and plant genetic resources for sustainability and productivity*. Austin, TX, USA, R.G. Landes and Academic Press. (in press)
46. Stevens, E.J.; Stevens S.J.; Flowerday, A.D.; Gardner, C.O and Eskridge, K.M. 1986. Developmental morphology of dent corn and popcorn with respect to growth staging and crop growth models. *Agron. J.* 78:867-874.
47. Torres, R.E. 1995. *Agrometeorología*. México: Editorial Trillas: UAAAN. Pp 106-109.

48. Turrent, F.A.; Camas, G.R.; López, L.A.; Cantú, A.M.; Ramírez, S.J.; Medina, M.J y Palafox, C.A. 2004. Producción de maíz bajo riego en el sur-sureste de México: I. Análisis agronómico. Agricultura técnica en México Vol. 30 Núm. 2. Pp 153-167.
49. Usherwood, N.R. 1985. The role of potassium in crop quality In: pp 490-509. R.D. Munson (Ed). Potassium in Agriculture. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
50. Van Veen, J.A.; Ladd, J.N and Amato, M. 1985. Turnover of carbon and nitrogen through the microbial biomass in a sandy loam and a clay soil incubated with (^{14}C (V)) glucose and (^{15}N) $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ under different moisture regimes. Soil Biol. Biochem. 17: 747-756.
51. Vincent, C.D. 1989. Recent advances in modeling crop response to temperature. Outl Agric. 18: 54-57.
52. Watts, W.R. 1973. Soil temperature and leaf expansion in *Zea mays* L. Exp.. Agric. 9: 1-8
53. Warrington, I.J. and Kanemasu, E. T. 1983a. Corn growth response to temperature and photoperiod. I. Seedling emergence, tassel initiation and anthesis. Agron. J. 75: 749-754.
54. Warrington, I.J. and Kanemasu, E. T. 1983. Corn growth response to temperature and photoperiod. III. Leaf number. Agron. J. 75: 762-766.
55. Westgate, M.E. 1994. Seed formation in maize during drought. In: K.J. Boote, J.M. Bennett, T.R. Sinclair & G.M. Paulsen, eds. Physiology and determination of crop yield. p. 361-364. Madison, WI, USA, American Society of Agronomy.
56. Wilson, D.R.; Muchow, R.C. and Murgatroyd, C. J. 1995. Model analysis of temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in cool climate. Field Crops Research. 43: 1-18.
57. Wong, R.; Muñoz, A. y Mendoza, L.E.O. 1983. Efecto de la sequía sobre características vegetativas, reproductivas y de eficiencia en variedades de sorgo. Agrociencia 51: 101-114.
58. Yagodin, B.A.; Peterburgoki, A.; Asarok, J.; Diomin, B.; Pleshhou, B and Resnetnikiva, N. 1986. Agroquímica. Tomo I y II. Traducciones al español de R. Rincón. Edit. Mir. Moscu, URSS.
59. Zinselmeier, C., Westgate, M.E. and Jones, R.J. 1995. Kernel set at low water potential does not vary with source/sink ratio in maize. Crop Sci., 35: 158-163.

CAPÍTULO II

La tensión de humedad en el suelo y la fertilización fosfatada sobre los componentes del rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) híbrido elotero A-7573, en Campeche, México

La tensión de humedad en el suelo y la fertilización fosfatada sobre los componentes del rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) híbrido elotero A-7573, en Campeche, México

Benigno Rivera-Hernández¹, Eugenio-Carrillo Ávila², José Jesús Obrador-Olán^{1*}, José Francisco Juárez-López¹, Lorenzo A. Aceves-Navarro¹

Colegio de Postgraduados: ¹Campus Tabasco, Periférico Carlos A. Molina s/n. H. Cárdenas, Tabasco, México; ²Campus Campeche, Calle Nicaragua No. 91, Tercer Piso, Campeche, Campeche, México

2.1. RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar, en un suelo Vertisol cálcico, el efecto de diferentes niveles de tensión de humedad y dosis de fertilización fosfatada sobre los componentes del rendimiento en maíz (*Zea mays* L.) híbrido elotero A-7573. Se estudiaron cuatro niveles del factor tensión de humedad en el suelo al momento del riego y tres de fertilización fosfatada (P₂O₅): -5, -30, -55 y -80 kPa y 60, 80 y 100 Kg ha⁻¹, respectivamente. Para conocer el efecto de los tratamientos se evaluó el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo. Los tratamientos fueron alojados en un diseño de parcelas divididas en bloques al azar. Los resultados mostraron que la tensión de humedad al momento del riego afectó de la misma forma a todas las variables de respuesta; el ANOVA indicó que los efectos de los tratamientos más húmedos (-5 y -30 kPa) fueron estadísticamente iguales, pero diferentes del efecto del tratamiento de -55 kPa que, a su vez, resultó diferente del efecto del tratamiento más seco ($p \leq 0.01$). Por otra parte, las dosis de 80 y 100 Kg ha⁻¹ de fósforo fueron estadísticamente iguales entre sí, pero diferentes de la dosis más baja en casi todos los casos ($p \leq 0.01$), lo cual sugiere que aplicaciones de 80 Kg ha⁻¹ de P son suficientes para que los caracteres agronómicos del híbrido A-7573 expresen su potencial genético. Tanto el estrés por falta de agua como el ocasionado por la deficiencia de fósforo afectaron a las variables en estudio, aunque en ninguno de ellos se observó interacción entre tratamientos de riego y de fertilización. La irrigación del cultivo de maíz elotero en el sur de Campeche es recomendable cuando la tensión de humedad en el suelo aumenta a -30 kPa a 0-30 cm de profundidad y aplicar una dosis de fertilización de 80 Kg ha⁻¹ de fósforo; con este manejo la longitud y el peso fresco promedio esperados de los elotes son 29.5 cm y 290 g, respectivamente, y el rendimiento promedio de elote es de alrededor de 16 t ha⁻¹. De acuerdo con las ecuaciones de regresión obtenidas, la eficiencia en el uso del agua de riego es de 40 Kg ha⁻¹ de elote por cada milímetro de lámina de riego aplicada.

Palabras clave: dosis, estrés hídrico, riego, Vertisol, crecimiento y desarrollo.

2.2. INTRODUCCIÓN

México ocupa el primer lugar mundial en consumo *per cápita* de maíz, con 127 Kg año⁻¹ (Nadal y Wise, 2005) y, aunque se utiliza principalmente como grano procesado, otra forma importante de consumo es en estado fresco o elote, del cual se ha generado poca información, lo que ha

limitado que se mejore su producción y calidad (Hernández *et al.*, 2001). El estado de Campeche se ubica en el sureste de México, en la región conocida como la península de Yucatán, donde las precipitaciones promedio son del orden de los 1200 mm, ocurriendo su mayoría en sólo cuatro meses del año. Esta distribución de las precipitaciones conlleva a que en los

meses restantes se presente un alto déficit de humedad que limita las actividades agrícolas (INEGI, 2007), razón por la cual algunos productores hacen uso del riego, utilizándolo en cultivos rentables como las hortalizas y el maíz elotero. Aunado a la problemática del agua, se encuentra el hecho de que los suelos agrícolas de la mencionada región son deficitarios en fósforo, además de que las aplicaciones al suelo, de dicho elemento, son poco eficientes debido a los altos contenidos de calcio que éste tiene. A pesar de la importancia que para los productores tiene el uso racional del agua, existen pocos estudios que indiquen su uso óptimo. De igual forma, pocos estudios se han realizado para recomendar dosis racionales de fertilización fosfórica. Independientemente de esto, en la región maicera del estado se han estimado rendimientos potenciales de hasta 8 t ha⁻¹ de maíz en grano los cuales, de manera general, son poco comunes debido principalmente a la problemática antes mencionada (Norman *et al.*, 1995; Turrent *et al.*, 2004).

Aunque la producción de maíz en México ha sido objeto de numerosas investigaciones relacionadas con el riego, en muy contadas ocasiones se han realizado estudios en los que se evalúe el efecto de la tensión de humedad del suelo sobre la producción de elote. La tasa de transpiración del maíz decrece cuando la tensión de humedad en el suelo aumenta, disminuyendo la acumulación de biomasa vegetal y el rendimiento de grano (Reicosky *et al.*, 1975; Wolfe *et al.*, 1988). Por su parte Eck (1986) menciona que el estrés hídrico en períodos de dos y cuatro semanas durante la fase de desarrollo vegetativo del cultivo reduce el rendimiento de grano en 23 y 46%, respectivamente, y que si estos mismos periodos de estrés se presentan durante la fase de llenado del grano, la disminución del

rendimiento es del orden de 17 y 33%, respectivamente.

Diversos estudios (Lu *et al.*, 2000; Kang *et al.*, 2004; Baboo, 2006; Wang *et al.*, 2007) realizados con riego de precisión o goteo han documentado las ventajas de manejar la humedad del suelo en términos de tensión de humedad, estimándola mediante tensiómetros. La tensión a la cual debe ser mantenida la humedad del suelo para un cultivo determinado puede ser transferida a otras localidades con suelos de propiedades físicas diferentes y con otras condiciones climáticas (Pier y Doerge, 1995). No obstante, es importante tener en cuenta que los requerimientos de riego en la planta de maíz varían temporal y espacialmente en función del clima, el manejo, la fase de crecimiento y la variedad (Doorenbos y Pruitt, 1977; Doorenbos y Kassam, 1980).

El fósforo (P) es un elemento esencial que se encuentra naturalmente en concentraciones bajas en suelos no perturbados (Brady y Weil, 2002). Cuando un suelo se incorpora al manejo agrícola, es necesario hacer aplicaciones de P vía fertilización edáfica. No obstante, por ser un elemento muy reactivo en suelos calcáreos como los de la península de Yucatán, interacciona con el calcio (Ca) formando fosfatos de calcio de baja solubilidad, impidiendo a los cultivos absorberlo en concentraciones adecuadas (Afif *et al.*, 1993; Hedley y McLaughlin, 2005; Sánchez, 2007; Wang *et al.*, 2005)

Por otra parte, la deficiencia de P tiene efectos negativos sobre los componentes del rendimiento y la calidad del elote, debido a que, de forma indirecta, afecta las características morfológicas y fisiológicas de las raíces, disminuyendo el número total de éstas y, por ende, su capacidad de absorción de agua y nutrimentos; también influye sobre el índice de área foliar (IAF)

disminuyendo la tasa de aparición, expansión y duración de la hoja, lo cual se ve reflejado en la acumulación de biomasa, especialmente durante las primeras fases de desarrollo del cultivo (Barry y Millar, 1989; Hajabbasi y Schumacher, 1994; Pellerin *et al.*, 2000; Colomb *et al.*, 2000;).

En el estado de Campeche, la demanda anual de elote no se satisface completamente con la producción estatal, debido a que los rendimientos y la calidad son predominantemente bajos, siendo las principales causas el uso inadecuado del riego y la deficiente fertilización. Por la importancia social, cultural y económica que representa este cultivo, se planteó esta investigación, cuyo objetivo fue evaluar el efecto de diferentes niveles de tensión de humedad en el suelo y dosis de fertilización fosfatada sobre los componentes del rendimiento en maíz (*Zea mays* L.) híbrido elotero A-7573.

2.3. MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1. Establecimiento del experimento

El experimento fue conducido de abril a julio del 2007 en el campo experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Campeche, el cual se ubica en el kilómetro 17.5 de la carretera federal Haltunchén-Edzná, en el municipio de Champotón, Estado de Campeche, México, cuyas coordenadas son: 19°29'55'' de latitud norte y 90°32'45'' de longitud oeste. La siembra del experimento se realizó el 13 de abril en una parcela con suelo Vertisol cálcico; el

material vegetativo utilizado fue maíz elotero (*Zea mays* L.) híbrido A-7573, el cual fue irrigado con un sistema de goteo con cintillas. Previo al establecimiento del cultivo se realizaron muestreos y análisis químicos del agua de riego y del suelo de la parcela en estudio. En este último caso, después de la preparación del terreno para la siembra, se tomó una muestra compuesta (que incluyó 15 submuestras).

2.3.2. Análisis del agua de riego y del suelo

Los análisis químicos efectuados al agua de riego y al suelo de la parcela se hicieron en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Plantas (LASPA) del Campus Tabasco-Colegio de Postgraduados, y de acuerdo con las metodologías que sugiere la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT, 2000). Los resultados del análisis del agua de riego se presentan en el Cuadro 2.1. El agua se clasifica como C3-S1, de salinidad alta y bajo riesgo de sodificar al suelo (Thorne y Peterson, 1963), aunque el problema potencial del riego para cultivos sensibles es moderado (U.S.D.A, 2005). En Campeche los suelos tienen una elevada permeabilidad debido a su naturaleza cárstica, además, las abundantes precipitaciones durante la temporada de lluvias lavan el exceso de sales, por lo que el agua aplicada con cintilla no parece constituir, a corto plazo, un riesgo real de salinización al suelo (Batllori y Febles, 2002).

Cuadro 2.1. Resultados del análisis químico del agua de riego.

pH	CE (dS m ⁻¹)	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄ (Cmol ₍₊₎ L ⁻¹)	K	Na	Ca	Mg	B (mg L ⁻¹)
7.0	1.267	0.80	5.95	9.94	4.55	0.08	5.33	10.73	1.97	4.99

Por otra parte, en el Cuadro 2.2 se muestran los resultados del análisis químico del suelo de la parcela. Los métodos analíticos y la interpretación se basaron en la Norma Oficial Mexicana citada anteriormente. La mayoría de los contenidos de los diferentes

nutrimentos del suelo no limitan el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz (IFA, 1992), excepto los de fósforo (P) y calcio (Ca) por deficiencia y exceso, respectivamente.

Cuadro 2.2. Resultados del análisis químico del suelo de la parcela experimental.

pH(H ₂ O) Rel. 1:2	CE (ds m ⁻¹)	MO (%)	N	P (mg Kg ⁻¹)	K	Ca	Mg (Cmol ₍₊₎ Kg ⁻¹)	Na	CIC
6.5	0.09	4.07	0.22	0.57	0.92	50.4	7.57	0.18	38

De acuerdo al valor de pH, el suelo se clasifica como moderadamente ácido, lo cual indica que la mayoría de los nutrimentos esenciales no tienen problemas de disponibilidad. El valor de Materia Orgánica (MO) encontrado en el suelo en estudio está en la categoría de alto, lo que es un buen indicador, dado el papel que juega la MO en la fertilidad física, química y biológica del suelo (Bot y Benites, 2005). Debido a la relación que existe entre las reservas orgánicas y el nitrógeno (N), no es extraño que el suelo presente valores de este nutrimento que lo ubican en la clase alta. En contraste, el valor de P-Olsen del suelo indica que el contenido es bajo, lo cual resalta la importancia de realizar aplicaciones altas de este nutrimento al suelo.

Todos los valores de las bases (potasio, calcio y magnesio) muestran alto suministro, lo cual en principio es favorable para el cultivo. No obstante, los altos contenidos de Ca afectan la disponibilidad de fósforo, dada la afinidad que ambos elementos tienen para formar compuestos insolubles (Espinosa y Molina, 1999). El valor de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo en estudio lo ubica en la clase alta, lo cual es un

buen indicador por la importancia que este parámetro tiene en la retención de nutrimentos y agua. Los resultados del análisis químico del suelo fueron usados para definir las dosis de fertilización de nitrógeno, fósforo y potasio (N-P-K), dando énfasis al segundo nutrimento (P).

2.3.3. Niveles de fertilización fosfórica

Para estimar la dosis de fertilización fosfórica se usó el modelo simplificado (Rodríguez, 1987), cuya fórmula es la siguiente:

$$DF = \frac{DC - SS}{EF} \quad (1)$$

Donde: DF representa la dosis de fertilización a aplicar (Kg ha⁻¹), DC la demanda de nutrimento del cultivo (Kg ha⁻¹), SS el suministro del nutrimento que aporta el suelo (Kg ha⁻¹) y EF la eficiencia que tiene el fertilizante en relación a la absorción de la planta (adimensional). Como DC depende del potencial productivo que tiene el cultivo en una región dada, para este estudio fue estimada en 24 Kg P₂O₅, que corresponde a la cantidad de este nutrimento que se requiere para alcanzar una producción de 12 t ha⁻¹ de elote, que representa el potencial del híbrido A-7573 (Hernández *et al.*, 2001)

bajo las condiciones ambientales de la región de estudio. SS mostró, de acuerdo a los resultados del análisis de fósforo, niveles muy bajos, prácticamente sin suministro, por el contrario, el Nitrógeno (N) y Potasio (K) presentaron suministros mayores a la demanda del cultivo, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (Cuadro 2.2). Para la unidad de suelo Vertisol cálcico se consideró una eficiencia de fertilización del 30%, de acuerdo al trabajo de Obrador (1991). Con base en lo antes expuesto la dosis de fertilización óptima estimada para fósforo (P_2O_5) fue de 80 Kg ha^{-1} .

2.3.4. Factores en estudio

Se estudiaron los factores tensión de humedad en el suelo al momento del riego y fertilización fosfórica, el primero tuvo cuatro niveles: -5, -30, -55 y -80 kPa, definidos con base en experiencias previas (Rhoads y Stanley, 1973; Rhoads y Stanley, 1974; Lu *et al.*, 2000; Salaya *et al.*, 2002; Kang *et al.*, 2004; Baboo, 2006; Orozco y Pérez, 2006; Wang *et al.*, 2007), y tratando de explorar la respuesta del maíz a niveles húmedos y relativamente secos del suelo. Para el factor fertilización fosfórica (P_2O_5) se establecieron tres niveles: 60, 80 y 100 Kg ha^{-1} (uno de ellos por encima y otro por debajo del estimado). Las dosis de manutención de nitrógeno (N) y potasio (K_2O) aplicadas fueron de 100 Kg ha^{-1} de cada uno.

2.3.5. Tratamientos

La combinación de los niveles de los dos factores en estudio dio como resultado la aplicación de los 12 tratamientos que se muestran en el Cuadro 2.3.

Cuadro 2.3. Tratamientos evaluados

Tensión de humedad (kPa)	Dosis de Fósforo (P_2O_5) (Kg ha^{-1})
-5	60
-5	80
-5	100
-30	60
-30	80
-30	100
-55	60
-55	80
-55	100
-80	60
-80	80
-80	100

2.3.6. Diseño experimental

Se utilizó un diseño en parcelas divididas (DPD), donde los niveles del factor riego (tratamientos) fueron alojados en las parcelas grandes en un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con tres repeticiones, y los niveles del factor fertilización fosfórica (subtratamientos) fueron alojados dentro de las parcelas chicas en un diseño completamente al azar (DCA) (Hinkelmann y Kempthorne, 1994; Martínez, 1996). Las parcelas grandes, de 96 m^2 de superficie, estuvieron constituidas por ocho hileras de plantas de 20 m de largo, con una separación de 60 cm entre hileras y 30 cm entre plantas, con una densidad de 55,500 plantas ha^{-1} . Dado que cada parcela grande fue subdividida en tres chicas para aplicar los subtratamientos de fertilización, el experimento estuvo conformado por 36 unidades experimentales de 32 m^2 .

2.3.7. Aplicación de los tratamientos

El control de los tratamientos del riego aplicado sobre las parcelas grandes se realizó mediante válvulas individuales conectadas en cada cintilla al inicio de las hileras de maíz, con goteros a cada 30 cm de

distancia. El momento de aplicación de los riegos fue determinado de acuerdo a la tensión del agua en el suelo, correspondiente a cada tratamiento, la cual se estimó con tensiómetros con manómetro, cuya cápsula porosa se instaló a 30 cm de profundidad, inmediatamente por debajo de la cinta de riego. Los manómetros se instalaron en el centro de cada parcela grande. Los tratamientos de riego iniciaron el 5 de mayo, cuando las plantas de maíz tenían una altura de 30 cm, previo a lo cual todas las unidades experimentales fueron irrigadas de manera homogénea para garantizar la germinación y emergencia de las semillas.

Para establecer los tratamientos de fertilización se utilizó una mezcla física de urea, cloruro de potasio y superfosfato de calcio triple. Dada la reactividad del P y la dinámica del N, el fertilizante se fraccionó en dos: la primera fertilización se hizo al momento de la siembra y la segunda 20 días después de la primera aplicación.

2.3.8. Variables evaluadas

Para establecer el efecto de los tratamientos de riego y fertilización sobre los caracteres agronómicos del mismo, se determinaron las variables: altura de planta (AP), diámetro del tallo (DT), longitud de hoja (LH), peso seco de tallo (PST), peso seco de hoja (PSH) y peso seco de planta (PSP). Para determinar el efecto de los tratamientos aplicados sobre las características de la calidad del elote se estudiaron las variables: longitud (LE), diámetro (DE), peso fresco (PFE), peso seco de los elotes (PSE), rendimiento en elotes frescos (REF) y rendimiento en elotes secos (RES). El peso y rendimiento del elote (fresco y seco) incluye el de las brácteas.

Las variables de respuesta AP, DT y LH fueron determinadas en cinco plantas seleccionadas al azar dentro de cada unidad

experimental, cuantificándose cada tres semanas, iniciando el 30 abril y concluyendo el primero de julio, aunque el análisis estadístico del experimento se realizó sólo con los datos tomados en la última fecha de medición. Para la definición de PST, PSH, PSP, LE, DE, PFE y PSE se tomó, en cada unidad experimental, una muestra aleatoria de cinco plantas, cuando el maíz tenía tres meses de edad y los elotes se encontraban en estado lechoso-masoso. El tallo, las hojas y los elotes fueron secados en estufa a 105°C hasta que alcanzaron un peso constante a fin de evaluar PST, PSH, PSP y PSE. Para la estimación de REF y RES se multiplicó el valor de PFE y PSE por el número de elotes por hectárea estimado, extrapolando a una hectárea el número de elotes en la parcela útil de cada unidad experimental. Cabe señalar que el porcentaje de plantas sin elote fue 10% y 35% para los tratamientos de -55 y -80 kPa de tensión de humedad, respectivamente, y que en los tratamientos de -5 y -30 kPa no se encontraron plantas sin elote.

2.3.9. Eficiencia del uso del agua

Se realizó una estimación de la eficiencia del uso del agua en cada unidad experimental con las siguientes expresiones, similares a las usadas por Lu *et al.* (2000):

$$EUAr = \frac{REF}{Lr} \quad (2)$$

$$EUAt = \frac{REF}{Lt} \quad (3)$$

Donde:

$EUAr$ = Eficiencia en el uso del agua de riego ($t\ ha^{-1}\ mm^{-1}$)

Lr = Lámina de riego aplicada (mm)

$EUAt$ = Eficiencia en el uso del agua total ($t\ ha^{-1}\ mm^{-1}$)

Lt = Lámina de agua total recibida por el cultivo (riego más precipitación) (mm)

2.3.10. Análisis de varianza

Se realizó el análisis de varianza del diseño de parcelas divididas en bloques para todas las variables de respuesta evaluadas. En las variables con diferencias estadísticas significativas, se realizó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($p \leq 0.01$) para establecer diferencias entre tratamientos.

2.3.11. Análisis de regresión

Se realizaron regresiones múltiples para relacionar los valores determinados en las variables de respuesta con los niveles de los factores en estudio. El modelo general probado fue:

$$y = a + bTh + cP + dTh^2 + eP^2 \quad (4)$$

Donde:

y = Variable de respuesta

Th = Tensión de humedad (kPa)

P = Fertilización fosfatada (Kg ha^{-1})

a, b, c, d, e = Parámetros del modelo

Los parámetros del modelo fueron determinados con el uso del software Statistical Analysis System (SAS, 2003), utilizando el procedimiento FORWARD BACKWARD STEPWISE que selecciona los coeficientes del modelo que superan un nivel de significancia previamente establecido ($\alpha = 0.5$). En el modelo de regresión 2 no se incluyó el término $Th \times P$ correspondiente a la interacción entre la humedad del suelo al momento del riego y la fertilización, debido a que en el análisis de varianza del experimento su efecto no fue

declarado significativo para ninguna de las variables de respuesta analizadas.

2.3.12. Labores culturales

Las labores agronómicas del cultivo de maíz fueron realizadas de acuerdo a las recomendaciones del paquete tecnológico de producción de maíz para el estado de Campeche (INIFAP, 2007).

2.3.13. Control de plagas

Durante el desarrollo del experimento se observó la incidencia de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* Smith) y gusano trozador (*Agrotis* spp), plagas que fueron controladas mediante la aplicación de cipermetrina en dosis de 0.5 L ha^{-1} aplicadas una sola vez y al momento en que las poblaciones de ambas plagas alcanzaron el umbral económico.

2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.4.1. Uso de la tensión de humedad para definir el momento de los riegos

La tensión de humedad en el suelo, medida diariamente con tensiómetros, fue utilizada para definir el momento de aplicación de los riegos en los tratamientos. En la Figura 2.1 se ilustra el comportamiento de la tensión de humedad en el suelo como función de la adición de agua en la superficie por riego y lluvia, para el período del 26 de mayo al 20 de junio: los riegos fueron aplicados cuando el manómetro del tensiómetro indicó la tensión usada en cada tratamiento. Para el período ilustrado se aplicaron cuatro riegos en el tratamiento de -55 kPa y solo uno para el tratamiento más seco en el bloque tres; en ocasiones el riego fue aplicado para valores de tensión de humedad ligeramente diferentes del preestablecido, debido a

variaciones bruscas en sus valores de un día al siguiente. En el resto de bloques, la

evolución de la tensión de humedad fue similar, aunque varió el número de riegos aplicados por tratamiento, siendo mayor en los de -5 y -30 kPa. La cantidad de agua aplicada en cada riego fue la necesaria para

hacer que el manómetro (o la tensión de humedad) descendiera a cero, indicando la saturación del suelo; por ello, en el tratamiento más seco (-80 kPa), la lámina de riego aplicada en cada riego fue en general mayor, dependiendo de los cambios espaciales en la textura del suelo, aunque la lámina total acumulada fue la más baja.

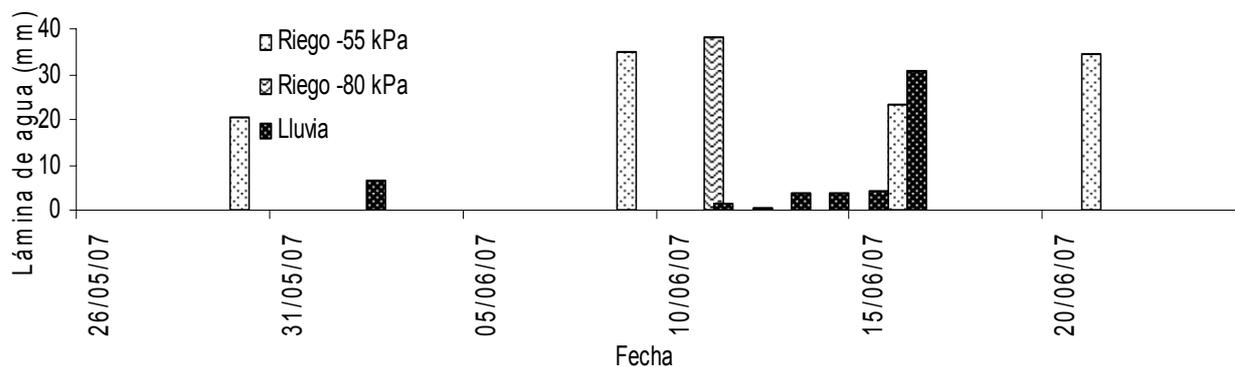


Figura 2.1. Evolución temporal de la tensión de humedad, usada para definir el momento del riego en las parcelas de los tratamientos de -55 y -80 kPa en el bloque tres, del 26 de mayo al 20 de junio de 2007.

2.4.2 Análisis de varianza del experimento

En el Cuadro 2.4 se presentan los valores de los niveles de significancia obtenidos en el análisis de varianza del diseño de parcelas divididas con las parcelas grandes alojadas en bloques completos al azar, para todas las variables de respuesta evaluadas. En todos los casos se encontraron diferencias altamente significativas entre tratamientos de riego ($p \leq 0.0001$) y entre tratamientos de fertilización ($p \leq 0.001$), indicativos del claro efecto que los niveles de ambos factores tuvieron sobre todas las variables de respuesta; es notorio también que los coeficientes de variación fueran bastante bajos, como resultado del cuidado que se tuvo en la medición de las variables y en la aplicación de los tratamientos. Similar al trabajo de Pérez y Cigales (2001), en

ninguna variable se observó interacción significativa entre tratamientos de riego y tratamientos de fertilización, aunque otros autores han reportado interacciones entre tensiones de humedad al momento del riego y dosis de fertilización (He *et al.*, 2004; Pérez *et al.*, 2004; Moser *et al.*, 2006; Orozco y Pérez, 2006). Por otra parte, con excepción de las variables PSE y RES, en el resto se encontraron efectos significativos (al 5%) de la interacción entre los tratamientos de riego y los bloques, indicativo de que la variación en el tipo de suelo entre bloques afectó la absorción de agua por las plantas. En el Cuadro 2.5 se presentan los resultados de la aplicación de la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($p \leq 0.01$). Se observa que el híbrido A-7573 presenta disminución en todas las variables de respuesta evaluadas conforme se incrementa

la tensión de humedad, así como cuando el suelo disminuye la dosis de fósforo aplicada al

Cuadro 2.4. Niveles de significancia (del análisis de varianza) para las variables de respuesta evaluadas en el maíz híbrido elotero A-7573 cultivado bajo cuatro tensiones de humedad en el suelo y tres dosis de fósforo en el estado de Campeche.

	Fuentes de variación	Tratamientos de riego	Bloques	Tratamientos riego x bloques	Tratamientos de fertilización	Riego x fertilización	CV
V A R I A B L E S	AP (cm)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.1636	1.92
	DT (cm)	<0.0001	0.0088	0.0286	<0.0001	0.4059	2.08
	LH (cm)	<0.0001	0.0004	0.0154	0.0004	0.3794	3.55
	PSH (g)	<0.0001	0.0174	0.0280	<0.0001	0.5081	6.68
	PST (g)	<0.0001	0.0595	<0.0001	<0.0001	0.5461	5.44
	PSP (g)	<0.0001	0.0577	<0.0001	<0.0001	0.9417	4.63
	DE (cm)	<0.0001	0.0006	0.0313	<0.0001	0.1989	1.47
	LE (cm)	<0.0001	0.4204	<0.0001	<0.0001	0.5749	2.63
	PFE (g)	<0.0001	0.0155	0.0025	0.0008	0.8243	4.52
	PSE (g)	<0.0001	0.0017	0.3360	<0.0001	0.2541	1.87
	REF (t ha ⁻¹)	<0.0001	0.0197	0.0120	0.0016	0.6676	4.90
	RES (t ha ⁻¹)	<0.0001	0.0006	0.2148	<0.0001	0.5153	1.73

CV=Coefficiente de variación; AP=Altura de planta; DT=diámetro del tallo; LH=Largo de las hojas; PSH=Peso seco de las hojas; PST=Peso seco de tallo; PSP=Peso seco de las plantas; DE=Diámetro del elote; LE=Longitud del elote; PFE=Peso fresco del elote; PSE=Peso seco del elote; REF=Rendimiento en elotes frescos; RES=Rendimiento en elotes secos.

Cuadro 2.5. Evaluación (Tukey, $p \leq 0.01$) del efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego y de la fertilización fosfatada en maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche.

Variables	Tratamientos de riego (kPa)					Tratamientos de fertilización (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)			
	-5	-30	-55	-80	DMS	60	80	100	DMS
AP (cm)	221.5a	219.2a	198.8b	183.2c	6.8	196.4b	208.1a	212.6a	5.4
DT (cm)	3.18a	3.15a	2.87b	2.74c	0.11	2.88b	3.01a	3.05a	0.09
LH (cm)	71.51a	69.54a	59.54b	54.70c	3.92	61.05b	64.98a	65.43a	3.13
PSH (g)	63.5a	63.4a	48.5b	38.9c	6.2	46.7b	56.0a	58.2a	4.9
PST (g)	51.1a	48.7a	34.3b	26.9c	3.8	33.3b	43.3a	44.1a	3.0
PSP (g)	114.5a	111.7a	82.8b	66.1c	7.5	80.0b	99.2a	102.1a	5.99
DE (cm)	5.54a	5.53a	4.59b	4.10c	0.13	4.83b	4.97a	5.02a	0.1
LE (cm)	31.35a	30.63a	26.30b	24.88c	1.29	27.21b	28.47a	29.20a	1.03
PFE (g)	300.6a	293.9a	239.7b	181.9c	19.9	241.5b	257.4a	263.2a	15.9
PSE (g)	70.5a	69.9a	57.8b	48.1c	2.0	58.4b	62.6a	63.7a	1.6
REF (t ha ⁻¹)	16.68a	16.31a	11.97b	6.56c	1.09	12.25b	13.05ab	13.35a	0.87
RES (t ha ⁻¹)	3.91a	3.88a	2.89b	1.73c	0.093	2.95b	3.15a	3.21a	0.074

Medias con la misma letra en una fila no son diferentes estadísticamente ($p \leq 0.01$); DMS=Diferencia mínima significativa; AP=Altura de planta; DT=Diámetro del tallo; LH=Largo de las hojas; PSH=Peso seco de las hojas; PST=Peso seco de tallo; PSP=Peso seco de las plantas; DE=Diámetro del elote; LE=Longitud del elote; PFE=Peso fresco del elote; PSE=Peso seco del elote; REF=Rendimiento en elotes frescos; RES=Rendimiento en elotes secos.

Es de resaltar que en todas las variables de respuesta el efecto de los tratamientos más húmedos (-5 kPa y -30 kPa) fue estadísticamente igual, pero diferente del efecto del tratamiento de -55 kPa, que a su vez resultó diferente del efecto del tratamiento más seco, en el que se observaron los valores promedio más bajos en todas las variables. En contraste, los mayores valores promedio de las variables se observaron en el tratamiento más húmedo, aunque fueron prácticamente iguales a los encontrados en el tratamiento de -30 kPa. En las variables AP, DT, LH, PSH, PST y PSP se observó una reducción de 10.25%, 9.75%, 16.74%, 23.62%, 32.88% y 27.69% respectivamente, entre el tratamiento de -55 kPa en relación a los valores máximos observados en el tratamiento más húmedo, y una reducción de 17.29%, 13.84%, 23.51%, 38.74%, 47.36% y 42.27%, respectivamente, entre el tratamiento más seco y el más húmedo. La reducción más notable se presentó en las variables PST y PSP, indicativo del efecto que tiene la baja disponibilidad de agua en el suelo sobre la formación de biomasa en los tallos. Las variables AP, DT y LH se vieron menos afectadas, dado que las plantas, a fin de captar más radiación solar, priorizan el crecimiento y la formación de hojas (Rhoads y Stanley, 1973 y 1974; Porro y Cassel, 1986; Schmidhalter, 1997 y Baboo, 2006). Por lo que respecta a los componentes del rendimiento en elote, se observó una reducción en los valores DE, LE, PFE, PSE, REF y RES de 17.15%, 16.11%, 20.26%, 18.01%, 28.24% y 26.09%, respectivamente, entre los tratamientos de -55 kPa y -5, y una disminución de 25.99%, 20.64%, 39.45%, 31.77%, 60.67% y 55.75% respectivamente entre el tratamiento más seco y el más húmedo. Las reducciones más severas se

presentaron en el rendimiento de elote fresco y seco y en el peso fresco promedio del elote, mientras que la longitud de los elotes se vio menos afectada por la restricción de humedad en el suelo.

Por otra parte, los efectos de las dosis de fertilización fosfatada de 80 y 100 Kg ha⁻¹ resultaron estadísticamente iguales, pero diferentes a la dosis más baja en todos los casos, con la única excepción de la variable REF, en la que los efectos de las dosis más bajas resultaron estadísticamente iguales (Cuadro 2.6). En las variables AP, DT, LH, PSH, PST y PSP se presentó una reducción de 7.6%, 5.57%, 6.69%, 19.76%, 24.49%, y 21.65% respectivamente, entre la dosis de 60 y la de 100 Kg P₂O₅ ha⁻¹.

Al igual que el estrés hídrico, la deficiencia de fósforo afecta en mayor proporción la formación de biomasa (PST y PSP), favoreciéndose el incremento de AP, DT y LH (Bennouna *et al.*, 2004)

En los componentes del rendimiento y calidad de elote, DE, LE, PFE, PSE, REF y RES, se observó una reducción de 3.78%, 6.82%, 8.24%, 8.32%, 8.24% y 8.09%, respectivamente, entre la dosis más baja y la más elevada (Cuadro 2.5). De manera similar al estrés hídrico, la deficiencia de fósforo afectó principalmente al peso del elote y al rendimiento en elote fresco, en tanto que el diámetro de elote disminuyó apenas un 3.78%.

Los valores del rendimiento en elote fresco obtenidos en esta investigación concuerdan con los encontrados por Hernández *et al.* (2001), de 16 t ha⁻¹ en un suelo de tipo Vertisol y obtenidos aplicando 60 Kg P ha⁻¹.

2.4.3. Análisis de regresión

En el Cuadro 2.6 se muestran las ecuaciones de regresión obtenidas, se incluyen solo los coeficientes cuyo efecto fue significativo. Se

seleccionaron además las ecuaciones con ordenada al origen positiva, debido a que los valores esperados en las variables de respuesta para valores nulos en la tensión de humedad y en la fertilización fosfatada no pueden ser negativos. Se presentan también los valores del coeficiente de determinación

r^2 de los modelos, así como los valores de la tensión de humedad y de la dosis de fósforo para las que se obtiene un valor máximo en el modelo para la variable. Los valores de los coeficientes de determinación para LE son aceptables, con un mínimo de 0.7632.

Cuadro 2.6. Ecuaciones de regresión obtenidas para las variables de respuesta.

Variable	Ecuación	r^2	Tensión de humedad para máximo (kPa)	Dosis de fósforo para máximo (Kg ha ⁻¹)
AP (cm)	AP = 134.72709 + 1.83717 P - 0.00631 Th ² - 0.00896 P ²	0.7844	0	102.52
DT (cm)	DT = 2.17847 + 0.02152 P - 0.00007251 Th ² - 0.00010938 P ²	0.7977	0	98.37
LH (cm)	LH = 37.47014 + 0.14420 Th + 0.80546 P - 0.00115 Th ² - 0.00435 P ²	0.8016	0	92.58
PSH (g)	PSH = 41.40399 + 0.28678 P - 0.00415 Th ²	0.8276	0	NC
PST (g)	PST = 33.4778 + 0.34718 Th + 0.2692 P	0.8098	0	NC
PSP (g)	PSP = 70.36075 + 0.55194 P - 0.00802 Th ²	0.8463	0	NC
DE (cm)	DE = 5.24223 + 0.00395 Th + 0.00479 P - 0.00019956 Th ²	0.9121	0	NC
LE (cm)	LE = 28.33773 + 0.09495 Th + 0.04990 P	0.7632	0	NC
PFE (g)	PFE = 182.89679 + 2.57492 P - 0.01938 Th ² - 0.01271 P ²	0.9008	0	101.3
PSE (g)	PSE = 36.30092 + 0.76646 P - 0.00373 Th ² - 0.00396 P ²	0.9532	0	96.78
REF (t ha ⁻¹)	REF = 10.674 - 0.0325 Th + 0.1276 P - 0.00202 Th ² - 0.0006246 P ²	0.9598	-8.05	102.13
RES (t ha ⁻¹)	RES = 2.3016 - 0.0082 Th + 0.0353 P - 0.000450 Th ² - 0.0001805 P ²	0.9844	-9.08	97.75

Th=Tensión de humedad en el suelo (kPa). P=Dosis de fósforo (Kg ha⁻¹). NC=No se puede calcular en el modelo obtenido. AP=Altura de planta; DT=Diámetro de tallo; LH=Largo de la hoja; PSH=Peso seco de la hoja; PST=Peso seco de tallo; PSP=Peso seco de la planta; DE=Diámetro de elote; LE=Longitud de elote; PFE=Peso fresco de elote; PSE=Peso seco de elote; REF=Rendimiento de elote en fresco; RES=Rendimiento de elote en seco.

Con excepción del rendimiento de elote fresco y seco para los que se obtuvo un valor máximo fisiológico, de acuerdo a los modelos de regresión a tensiones de humedad de -8.05 kPa y -9.08 kPa, respectivamente, en el resto de variables el valor máximo en los modelos se presentó a una tensión de humedad cero (suelo saturado).

En las variables PSH, PST, PSP, DE y LE se observó un comportamiento lineal directamente proporcional entre la dosis de fósforo aplicada y los valores determinados para las mismas, por lo que no fue posible

calcular la dosis que maximiza sus valores. En el resto de variables la dosis para el máximo siempre se observó cerca del nivel de P más alto en estudio. Ambos resultados sugieren que la dosis óptima fisiológica se encuentra cerca de 100 Kg P ha⁻¹. El efecto de la tensión de humedad al momento del riego sobre la altura de las plantas de maíz se muestra en la Figura 2.2, y sobre la longitud del elote en la Figura 2.3, ambas muestran los resultados de la aplicación de los modelos obtenidos por regresión para las tres dosis de fertilización en estudio.

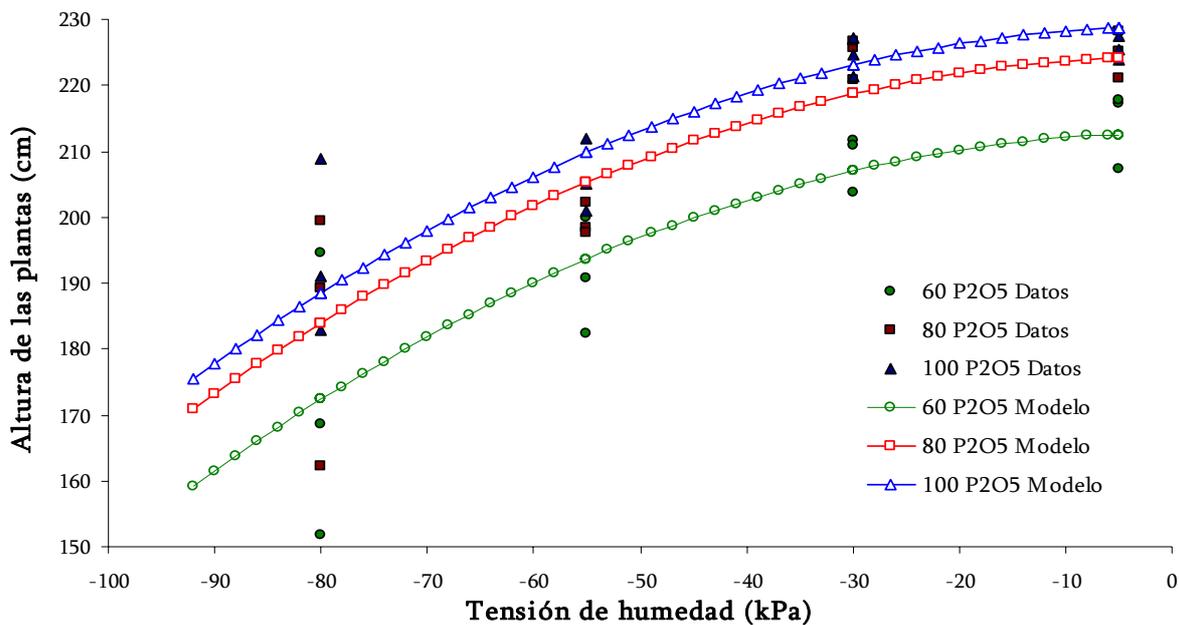


Figura 2.2. Efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego y la fertilización fosfatada sobre la altura de las plantas de maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche.

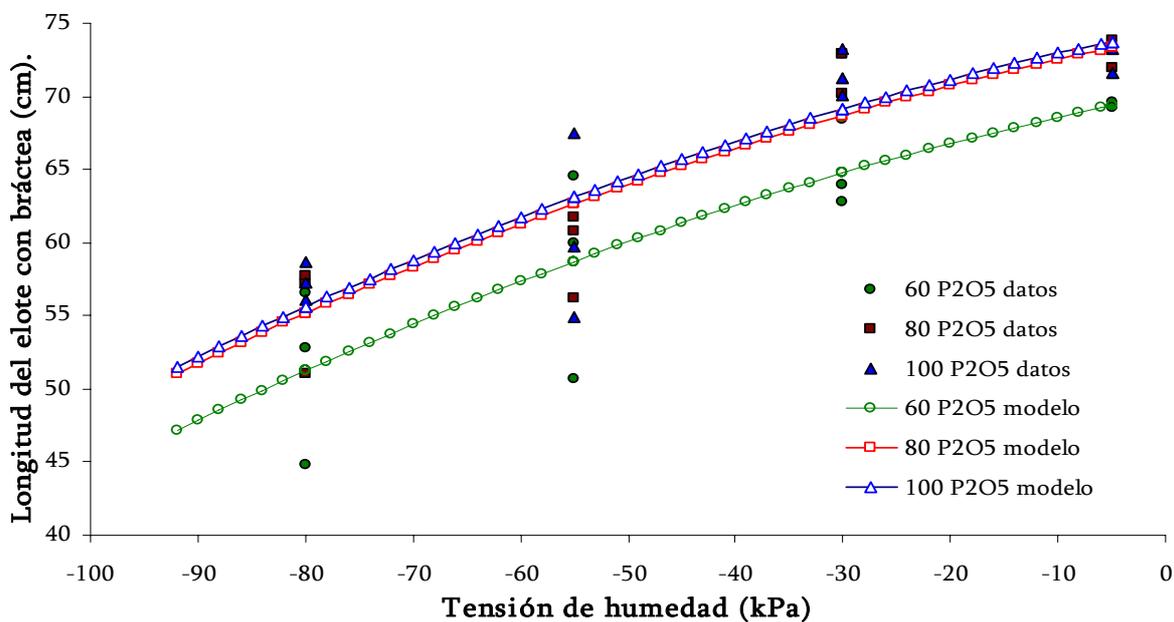


Figura 2.3. Efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego y la fertilización fosfatada, sobre la longitud de elote (incluyendo las brácteas), en plantas de maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche.

Similar al resto de variables, se observa un aumento en los valores de la altura de las plantas y de la longitud de los elotes conforme la tensión de humedad en el suelo al momento del riego fue menor, aunque con una ligera tendencia a reducir la tasa de crecimiento conforme la humedad del suelo aumenta, lo que se refleja en una curva suave en los modelos ajustados. En casi todas las variables los valores tienden a crecer conforme el suelo se satura de agua, lo que sugiere la necesidad de explorar con más detalle la respuesta del maíz a tensiones de humedad cercanas de la saturación (entre -40 y -5 kPa) para aumentar la precisión de los resultados. De manera general, se observa que los modelos representan adecuadamente el comportamiento de ambas variables como función de la dosis de fertilización y de la tensión de humedad aplicadas. El efecto de aplicar 80 y 100 Kg de P_2O_5 ha^{-1} es muy similar en todas las variables, por lo que, aunque los modelos de regresión señalan como dosis óptima fisiológica valores de 92.58 a 102.52 Kg P ha^{-1} (Cuadro 2.6), del análisis de varianza se desprende que aplicando solo 80 Kg P ha^{-1} se obtienen resultados estadísticamente iguales en todos los casos. No obstante, en las variables PSH, PST, PSP, DE y LE se encontró una relación lineal entre sus valores y la dosis de fósforo aplicada.

La Figura 2.4 muestra el efecto de los factores en estudio sobre el peso fresco de

elote, construida graficando el modelo obtenido para esta variable (Cuadro 2.6). El valor máximo se aprecia para una dosis de 101.3 Kg ha^{-1} de fósforo, a una tensión de humedad cero. Dado que en un suelo saturado de agua las plantas no podrían crecer, se requerirá, como fue expuesto previamente, estudiar el efecto de la humedad del suelo sobre el peso de los elotes de manera más detallada para valores cercanos de la saturación. En la Figura 2.5 se ilustra el comportamiento del rendimiento en elote fresco como función de la tensión de humedad y la fertilización fosfatada, apreciándose el valor máximo fisiológico para esta variable en 17.32 t ha^{-1} para -8.05 kPa de tensión de humedad al momento del riego, con una dosis de fertilización fosfatada de 102.13 Kg P ha^{-1} (Cuadro 2.6). Tanto en esta variable como en el rendimiento en elote fresco el modelo de regresión ajustado permitió definir el valor de la tensión de humedad en el suelo para el óptimo fisiológico.

Aunque en todos los casos fue posible definir valores en las variables independientes que conducen al máximo fisiológico, del análisis de varianza se desprende que con una tensión de humedad al momento del riego de -30 kPa y una dosis de 80 Kg P ha^{-1} se obtienen valores en las variables de respuesta estadísticamente iguales al óptimo fisiológico.

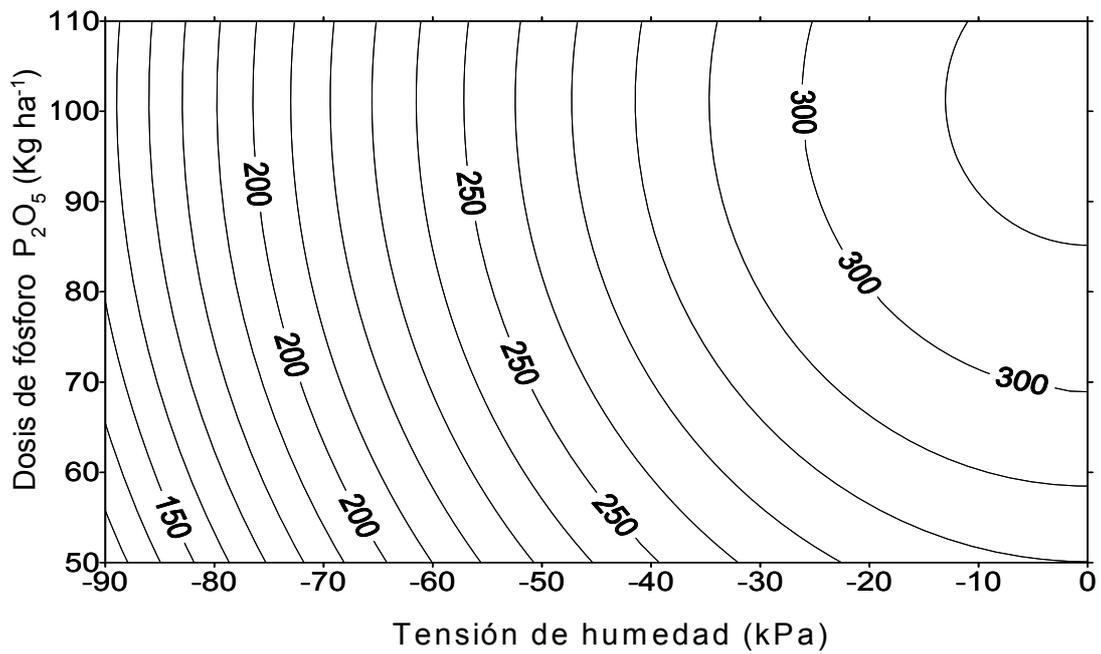


Figura 2.4. Efecto de la dosis de fertilización fosfatada y la tensión de humedad en el suelo sobre el peso fresco de elote (g) en maíz híbrido elotero A-7573.

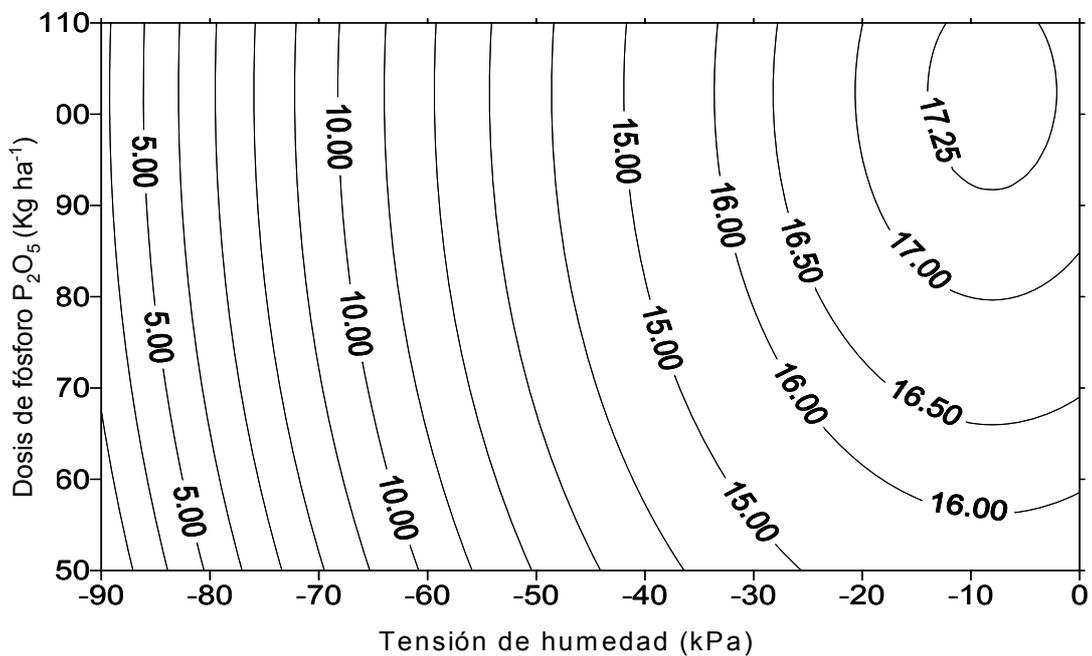


Figura 2.5. Efecto de la dosis de fertilización fosfatada y la tensión de humedad en el suelo sobre el rendimiento de elote fresco (t ha⁻¹) en maíz híbrido elotero A-7573.

2.4.4. Eficiencia en el uso del agua

En el Cuadro 2.7 se muestra el número de riegos aplicados en cada tratamiento y bloque, desde la siembra, realizada en abril hasta el término del experimento, a inicios de julio, así como el número promedio de riegos, la lámina de riego aplicada y la

lámina total de agua que recibió cada tratamiento de tensión de humedad. La diferencia entre los dos últimos valores estuvo condicionada por la precipitación (50.4 mm) que se presentó en el área durante el desarrollo del experimento.

Cuadro 2.7. Número de riegos aplicados, número promedio de riegos, y lámina de agua aplicada en los tratamientos de tensión de humedad evaluados.

Tratamiento de riego	Número de riegos				Lr (mm)	Lt (mm)
	Bloque uno	Bloque dos	Bloque tres	Promedio*		
-5 kPa	30	30	29	29.7	493.6	544.0
-30 kPa	20	22	22	21.3	403.1	453.5
-55 kPa	14	16	17	15.7	290.0	340.4
-80 kPa	12	14	12	12.7	210.9	261.3

Notas: Lr y Lt: Lámina de riego aplicada y total, *promedio de los tres bloques.

En el Cuadro 2.8 se muestra la eficiencia del uso del agua (de riego y total) en el rendimiento en elote fresco. Llama la atención que en el tratamiento más húmedo tuvo una baja eficiencia de uso del agua en ambas categorías (penúltimo) debido a que el suelo se mantuvo cercano a la saturación durante el ciclo de cultivo. La mejor eficiencia en el uso del agua de riego se obtuvo para el tratamiento de -55 kPa, en el

que sin embargo, se obtuvo uno de los menores rendimientos en elote. La mayor eficiencia del uso del agua total se presentó en el tratamiento de -30 kPa, con un rendimiento en elote fresco estadísticamente igual al observado en el tratamiento más húmedo, aunque su valor fue prácticamente igual a la eficiencia obtenida en el tratamiento de -55 kPa.

Cuadro 2.8. Eficiencia del uso del agua de riego (EUAr) y total (EUAt) para cada tratamiento de riego en el rendimiento de elote fresco (REF).

Tratamiento de riego	REF (t ha ⁻¹)	EUAr (t ha ⁻¹ mm ⁻¹)	EUAt (t ha ⁻¹ mm ⁻¹)
-5 kPa	16.68	0.03380	0.03067
-30 kPa	16.31	0.04047	0.03598
-55 kPa	11.97	0.04128	0.03517
-80 kPa	6.6	0.03112	0.02512

2.5 CONCLUSIONES

Los diferentes niveles de tensión de humedad al momento del riego afectaron de la misma forma a todas las variables de respuesta estudiadas. El análisis de varianza del experimento mostró que los tratamientos más húmedos (-5 y -30 kPa) fueron estadísticamente iguales, pero diferentes del efecto del de -55 kPa, que a su vez resultó diferente del más seco ($p \leq 0.01$). Los mayores valores promedio en todas las variables se observaron en el tratamiento más húmedo, como resultado de la baja tensión existente entre la matriz del suelo y las moléculas de agua.

En todas las variables de respuesta evaluadas los efectos de las dosis de fertilización fosfatada de 80 y 100 Kg ha⁻¹ resultaron estadísticamente iguales, diferentes del efecto de la dosis más baja en todos los casos ($p \leq 0.01$), con la única excepción de la variable rendimiento de elote fresco, donde todas fueron estadísticamente iguales. Las aplicaciones de 80 Kg P ha⁻¹ son suficientes para que los caracteres agronómicos del híbrido A-7573 expresen su potencial genético.

El estrés por falta de agua y el ocasionado por la deficiencia de fósforo afectaron mayormente a las variables relacionadas con la formación de biomasa y peso de elote: PST, PSP, PFE, PSE, REF y RES y en menor proporción, a las relacionadas con el crecimiento de la planta y el elote: AP, DT, LH y DE.

No se observó interacción entre tratamientos de riego y de fertilización.

Las regresiones múltiples usadas para relacionar los valores medidos en las variables de respuesta con los factores en estudio mediante un modelo cuadrático, indicaron que la dosis óptima de fósforo siempre estuvo cerca o por encima del nivel más alto en estudio, de 100 Kg ha⁻¹. En contraste, el valor máximo de casi todas las

variables en los modelos siempre se encontró a una tensión de humedad cero. Las únicas excepciones fueron las variables REF y RES, para las que los modelos cuadráticos predicen un valor máximo fisiológico a tensiones de humedad al momento del riego de -8.05 kPa y -9.08 kPa respectivamente.

2.6. LITERATURA CITADA

1. Afif, E., Matar, A. y Torrent, J. 1993. Availability of phosphate applied to calcareous soils of West Asia y North Africa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 756-760.
2. Barry, D.A.J. y Millar, M.H. 1989. Phosphorus nutritional requirement of maize seedlings for maximum yield. *Agron. J.* 81: 95-99
3. Brady, C.N. y Weil, R.R. 2002. The nature and properties of soil. Thirteenth Edition. pp 592-596. Upper Saddle River, New Jersey.
4. Baboo, S.R. 2006. Leaf water potential in corn and cotton in relation to root zone soil water status and depth of rooting. Poster. The 18th World Congress of Soil Science. Philadelphia, Pennsylvania.
5. Batllori S., E. y Febles P., J.L. 2002. El agua subterránea en el desarrollo regional de la península de Yucatán. *Avances y Perspectivas* 21: 67-77
6. Bennouna, B., A. Lahrouni., O. Bethenod., C. Fournier., B. Andrieu and S. Khabba. 2004. Development of maize internodes under drought stress. *Agron. J. Asian.* 2: 94-102.
7. Bot, A. y Benites, J. 2005. The importance of soil organic matter. *FAO Soils Bulletin* No. 80. Rome (*available at <http://www.fao.org/docrep/009/a0100e/a0100e00.htm>*)
8. Colomb, B., Kiniry, J.R, y Debaeke, P. 2000. Effect of soil phosphorus on leaf development and senescence dynamics of field-grown maize. *Agron. J.* 92: 428-435.
9. Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. 1977. Crop water requirements. *FAO. Paper* 24. Roma, Italia. 144 p.
10. Doorenbos, J. y Kassam, A. H. 1980. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Bulletins* 33. *FAO. Rome*, pp. 5-45.
11. Eck, H. V. 1986. Effects of water deficits on yield, yield components and water use

- efficiency of irrigated corn. *Agron. J.* 78: 1035-1040.
12. Espinosa, J. y Molina, A. 1999. Acidez y enclado de los suelos. Instituto de Potasa y el Fósforo (INPOFOS). 42 p.
 13. Hajabbasi, M.A y Schumacher, T.E. 1994. Phosphorus effects on root growth and development in two maize genotypes. *J. Plant and Soil.* 158: 39-46.
 14. He, Y., Shen, Q., Kong, H, Xiong, Y. and Wang, X. 2004. Effect of soil moisture content and phosphorous application on phosphorous nutrition of rice cultivated in different water regime systems. *J. of Plant Nutrition* 27(12): 2259-2272.
 15. Hedley, M. J. y McLaughlin, M. J. 2005. Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soils. pp 181–252. In J.T. Sims and A.N. Sharpley (ed.) *Phosphorus: Agriculture and the environment.* Agron. Monogr. No. 46. ASA, CSSA, and SSSA. Madison, WI.
 16. Hernández, A.J.A., Ramiro, C.A., Maya, H.V., Chaverria, C.J y Martínez, G.M. 2001. El cultivo de maíz para elote en la zona media de San Luis Potosí. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), CIR-Centro de Investigación Regional del Noreste, Campo Experimental las Palmas. Folleto Núm. 26 pp 5-13.
 17. Hinkelmann, K. y Kempthorne, O. 1994. Design and analysis of experiments. Vol. I: Introduction to experimental design. John Wiley y Sons, Inc. New York, 495 P.
 18. IFA (INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION). 1992. World fertilizer use manual. Germany. 427 p.
 19. INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2007. Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos. 158 p.
 20. INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias). 2007. Paquetes Tecnológicos Para Maíz De Temporal (Ciclo Agrícola Primavera-Verano), Para Condiciones De Alto, Medio Y Bajo Potencial Productivo. 49 p.
 21. Kang, Y., Wang F.X., Liu, H.J. and Yuan, B.Z. 2004. Potato evapotranspiration and yield under different drip irrigation regimes. *Irrig. Sci.* 23: 133-143.
 22. Lu, J.; Ookawa, T. and Hirasawa, T. 2000. The effect of irrigation regimes on the water use, dry matter production and physiological responses of paddy rice. *Plant and Soil* 223: 207-216.
 23. Moser B.S., Feil, B., Jampatong, S. y Stamp, P. 2006. Effects of pre-anthesis drought fertilizer rate, and variety on grain yield, yield components, and harvest index of tropical maize. *Agricultural Water Management* 81: 41-58.
 24. Martínez, G.A. 1996. Diseños experimentales. Métodos y elementos de teoría. Editorial Trillas. 1988 (reimpresión 1996). México. 756 p.
 25. Nadal, A. y T.A. Wise. 2005. Los costos ambientales de la liberalización agrícola: el comercio de maíz entre México y Estados Unidos en el marco del NAFTA. In: Blanco, H., L. Togueiro de A. y K.P. Gallagher (editores): *Globalización y Medio Ambiente, Lecciones desde las Américas.* RIDES-GDAE. Santiago, Chile. pp. 49-92
 26. NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT. México. 88 p.
 27. Norman, M.J.T., Pearson, C.J. y Searle, P.G.E. 1995. The ecology of tropical food crops. New York, NY, USA, Cambridge University Press. 430 pp.
 28. Obrador O., J.J. 1991. Dinámica del fósforo en unidades de suelos del estado de Tabasco. Tesis Profesional. Universidad Veracruzana. Orizaba, Veracruz, México.
 29. Orozco, R.J. y Pérez, Z.O. 2006. Tensión de humedad del suelo y fertilización nitrogenada en plátano (*Musa* AAA Simmonds) cv. Gran Enano. *Agrociencia* 40: 149-162.
 30. Pellerin, S., Mollier, A y Plénet, D. 2000. Phosphorus deficiency affects the rate of emergent and number of maize adventitious nodal roots. *Agron. J.* 92: 690-697.
 31. Perez, Z.O. y Cigales, R.M. 2001. Tensión de humedad del suelo y fertilización nitrogenada en melón cantaloupe. *Agrociencia* 35: 479-488.
 32. Perez, Z.O., Cigales, R.M.R., Orozco, S.M. y Pérez, C.K.G. 2004. Tensión de humedad del suelo y fertilización nitrogenada en melón cantaloupe. Segunda parte. *Agrociencia* 38: 261-272.
 33. Pier, J.W. y Doerge, T.A. 1995. Nitrogen and water interactions in trickle-irrigated watermelon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 145-150.

34. Porro, I. y Cassel, D. K. 1986. Response of corn to tillage and delayed irrigation. *Agron. J.* 78: 688-693.
35. Reicosky, D. C., Campbell, R.B. y Doty, C.W. 1975. Diurnal fluctuation of leaf-water potencial of corn as influenced by soil matrix potencial and microclimate. *Agron. J.* 67:380-385.
36. Rodríguez, S. J. 1987. Desarrollo de normas de fertilización para el cultivo de maíz y la cebada en el estado de Tlaxcala. Colegio de Postgraduado Montecillo, México.
37. Rhoads, F.M. y Stanley, R.L. 1973. Response of three corn hybrids to low levels of soil moisture tension in the plow layer. *Agron. J.* 65. 315-318.
38. Rhoads, F.M. y Stanley, R.L. 1974. Response of corn (*Zea mays* L) grown on soil of three classes to plow layer management. *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.* 34: 1-3.
39. Sánchez, C. A. 2007. Phosphorus. pp 51-82. In: *Handbook of Plant Nutrition* Edited by Broker, A. V. y Pilbeam, D. J. Taylor y Francis. Grup. Boca Raton. London, New Cork.
40. Salaya, D., J.M.; Carrillo A., E.; Palacios V., O.L.; Aceves N., L.A.; y Juárez L., J.F. 2002. Respuesta del cultivo de sandía (*Citrullus vulgaris* Schrad) al potencial del agua en el suelo. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25 (2): 127-133.
41. SAS (Statistical Analysis System 9.1.3). 2003. Service pack 2, versión para Windows 5.2.3790. SAS Institute Inc., Cary, NC. USA.
42. Schmidhalter, U. 1997. The gradient between pre-dawn rhizoplane and bulk soil matriz potentials, and its relation to the pre-dawn root and leaf water potentials of four species. *Plant, Cell and Environment* 20: 953-960.
43. Thorne, D.W.; Peterson, H.B. 1963. Técnica del riego: fertilidad y explotación de los suelos. CECSA, México, DF, MX. 496 p.
44. Turrent, F. A., Camas, G. R. López, L. A.; Cantú, A. M.; Ramírez, S. J.; Medina, M. J y Palafox, C. A. 2004. Producción de maíz bajo riego en el sur-sureste de México: I. Análisis agronómico. *Agricultura Técnica en México* 30 (2): 153-167.
45. Wang, Q.R., Li, J., Li, Z. and Christie, P. 2005. Screening chinese wheat germoplasm for fosforousefficiency in calcareous soils. *J. Plant Nutrition* 28: 489-505.
46. Wang, D., Kang, Y. y Wan, S. 2007. Effect of soil matric potential on tomato yield and water use under drip irrigation condition. *Agricultural Water Management* 87: 180-186.
47. Wolfe, D. W., Henderson, D.W., Hsiao, T. C y Alvino, A. 1988. Interactive water and nitrogen effects on senescence of Maize. II. Photosynthetic decline and longevity of individual leaves. *Agron. J* 80: 859-864.

CAPÍTULO III

Calidad del maíz (*Zea mays* L.) híbrido elotero A-7573 como respuesta a la tensión de humedad al momento del riego y a la fertilización fosfatada en Campeche, México

Calidad del maíz (*Zea mays* L.) híbrido elotero A-7573, como respuesta a la tensión de humedad al momento del riego y a la fertilización fosfatada en Campeche, México

Benigno Rivera-Hernández¹, Eugenio-Carrillo Ávila², José Jesús Obrador-Olán^{1*}, José Francisco Juárez-López¹, Lorenzo A. Aceves-Navarro¹

Colegio de Postgraduados: ¹Campus Tabasco, Periférico Carlos A. Molina s/n. H. Cárdenas, Tabasco, México; ²Campus Campeche, Calle Nicaragua No 91 Tercer Piso,

3.1. RESUMEN

En México la producción de maíz se destina principalmente a la alimentación humana, una parte de la cual se consume en forma de elote. En el presente trabajo se evaluó la calidad de los elotes producidos como respuesta a cuatro niveles de tensión de humedad en el suelo al momento del riego: -5, -30, -55 y -80 kPa, y tres niveles de fertilización fosfatada: 60, 80 y 100 Kg ha⁻¹, en suelos de origen cárstico del sureste de México. Se utilizó un diseño experimental en parcelas divididas, con los niveles del factor riego en las parcelas grandes. Se determinaron las variables: peso fresco (*PFEB*), peso seco (*PSEB*), diámetro (*DEB*), y largo de los elotes (*LEB*) en todos los casos sin brácteas, así como el número de granos (*NGxE*), el número de granos sin llenar (*NGSLL*), el número de hileras (*NHxE*) y el peso seco del grano por elote (*PSG*). También se determinó el rendimiento en elote fresco (*REF*), y en elote seco (*RES*), y el índice de cosecha (*IC*). Con excepción de *IC* en la que no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos de riego ni de fertilización, en el resto de variables los efectos de los tratamientos más húmedos (-5 y -30 kPa) fueron declarados estadísticamente iguales, pero diferentes del efecto del tratamiento de -55 kPa, que a su vez resultó diferente del efecto del tratamiento más seco ($p \leq 0.01$), en el que se observó el mayor *NGSLL*, así como los valores promedio más bajos en el resto de variables. En todos los casos los efectos de las dosis más altas de fósforo resultaron estadísticamente iguales ($p \leq 0.01$), con el menor *NGSLL* y los mayores valores en el resto de variables. Se obtuvieron ecuaciones de regresión usando un modelo cuadrático, en las que se determinaron dosis de fertilización de 87.1 a 99.0 Kg ha⁻¹ de fósforo que minimizan *NGSLL* y maximizan los valores del resto de variables. La mayor eficiencia en el uso del agua de riego se encontró en el tratamiento de tensión de humedad de -30 kPa, con el que se obtuvo un aumento de 27 Kg ha⁻¹ de elotes por cada milímetro de agua de riego aplicada. Por los estudios realizados, se recomienda emplear -30 kPa como indicativo del momento del riego en el cultivo, con una dosis de 80 Kg ha⁻¹ de fertilización fosfatada, niveles para los que se encontraron valores estadísticamente más altos en *LEB*, *DEB*, *PFEB*, *NGxE*, *REF* y *RES*, y con los que el *REF* obtenido, de 11 ton ha⁻¹, superó en un 16% al promedio nacional y fue tres veces superior al rendimiento promedio estatal

Palabras clave: elotes, estrés hídrico, dosis de fertilización, fósforo, suelo Vertisol..

3.2. INTRODUCCIÓN

En México en los últimos siete años la superficie cultivada con maíz elotero se incrementó en 54.4%, pasando de 31,260 ha en el año 2000 a 68,576 ha en 2007 (SIAP, 2007). En el año 2006 la producción

nacional de elote fue de 648,238 toneladas, con un valor de \$963.2 millones de pesos y un rendimiento promedio de 9.77 t ha⁻¹ (SIAP, 2007). En el estado de Campeche el maíz es cultivado por más de 34,872 productores, y destinado principalmente para la alimentación humana como grano seco y

elote (SAGARPA, 2006). En los últimos años el consumo de elote se ha incrementado en el sector urbano del estado; sin embargo la demanda no es totalmente satisfecha, debido al bajo rendimiento obtenido por los productores y a la estacionalidad de su producción. El rendimiento promedio estatal de maíz en elote fue de solo 3.64 t ha⁻¹ en 2004, muy inferior al rendimiento medio nacional de 9.77 t ha⁻¹ en el mismo año (SIAP, 2007), lo que se debe, entre otros factores, a que no existe una metodología establecida para la aplicación de los riegos, y a que una gran parte del maíz es cultivado en suelos poco profundos y/o deficientes en fósforo.

En Campeche la distribución temporal y espacial de la lluvia es muy irregular, con valores promedio anuales que varían de norte a sur desde un poco más de 950 mm en el municipio de Calkiní, hasta 1,945.9 mm en Palizada (INEGI, 2007). La mayoría de la precipitación se presenta durante los meses de junio a noviembre, pero su distribución irregular no garantiza la satisfacción de las necesidades de agua para el maíz, a pesar de que su cultivo en el estado se realiza principalmente durante la temporada de mayor precipitación pluvial. La falta de agua en el suelo en el que se desarrolla el cultivo durante alguna o algunas de las etapas fenológicas de la planta ocasiona disminuciones en su crecimiento y rendimiento. Lorens *et al.*, (1987) señalan que el efecto del déficit hídrico en la disminución del rendimiento de los cultivos depende de su estado de desarrollo, del tiempo y la duración del estrés hídrico, así como de la susceptibilidad del genotipo. Al respecto, Bassetti y Westgate, (1993) reportan que, en estado reproductivo, el déficit hídrico en el cultivo de maíz inhibe la elongación del estigma y retrasa su

emergencia (Schussler y Westgate, 1994; Li, 2002), reduce el número de los estigmas y el número de granos por mazorca (Bassetti y Westgate, 1993) así como el rendimiento de grano, la calidad del elote (Li, 2002) y el peso final de la mazorca. Por su parte Mcpherson y Boyer (1977) y Ouattar *et al.*, (1987) argumentan que cuando se presenta durante el estado vegetativo de los cultivos, el estrés hídrico disminuye la acumulación de biomasa (incluyendo raíces) e incrementa la senescencia de las hojas, disminuyendo la producción de fotoasimilados necesarios para el crecimiento y desarrollo de la planta. La mayoría de los suelos de Campeche en los que se cultiva maíz son de origen cársico, de manera general presentan muy bajos contenidos de fósforo (P) y concentraciones muy elevadas de calcio, lo que origina que el agua de los acuíferos tenga contenidos elevados de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. La problemática nutrimental de P en el cultivo de maíz, se ve agravada por la reactividad que tiene con el Ca. La eficiencia del fósforo aplicado en los fertilizantes es muy baja y a menudo no se le considera para las recomendaciones de dosis de fertilización (Lindsay, 1979; Hedley y McLaughlin, 2005). El fósforo es un nutrimento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, el segundo de mayor importancia, y juega un papel preponderante en la producción de energía en los proceso de fosforilización (Marschner, 1995; Tisdale *et al.*, 1997). La mayoría de las plantas absorben el fósforo como ión ortofosfato ya sea primario o secundario (Borrero *et al.*, 1988), los altos contenidos de calcio de los suelos mencionados, forman hidroxifosfatos de calcio que son compuestos insolubles que las plantas no pueden absorber (Mc Beath *et al.*, 2006), lo que les genera deficiencias en

el elemento. Colomb *et al.*, (2000) y Pellerin *et al.*, (2000) argumentan que la deficiencia de fósforo en el suelo disminuye la tasa de aparición, expansión y duración de la hoja, la acumulación de biomasa en la planta de maíz (Arain *et al.*, 1989; Barry y Millar, 1989), y disminuye el tamaño del meristemo y el número final de granos por mazorca.

Ali *et al.*, (2002) estudiaron el efecto de tres niveles de nitrógeno (0, 90 y 150 Kg ha⁻¹) y cuatro niveles de fósforo (0, 60, 90 y 120 Kg ha⁻¹) sobre el crecimiento y rendimiento del maíz, encontrando los mayores valores de altura de planta (289.99 cm), número de mazorcas por planta (1.73), número de granos por mazorca (344), peso seco de mil granos (320.91 g) y rendimiento de grano (3.81 t ha⁻¹) con las dosis de 150 Kg N ha⁻¹ y 90 Kg P ha⁻¹. Sharpley y Reed, (1982) mencionan que el estrés hídrico en el suelo reduce el crecimiento de los cultivos, pero indican que dosis elevadas de fósforo pueden disminuir el efecto del estrés hídrico en la planta. Por su parte, Elliott y Läuchli, (1985) mencionan que la absorción de fósforo y su utilización difieren entre genotipos de maíz.

En México numerosos estudios han documentado el efecto negativo del déficit de humedad en el suelo sobre la producción de grano en el cultivo de maíz (López y Salazar, 1998; Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006). Sin embargo, existe poca investigación sobre el efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego sobre el rendimiento y calidad del maíz elotero. Por otra parte, aunque diversos estudios señalan la importancia del fósforo en el rendimiento y calidad del elote (Barry y Millar, 1989; Ali et al., 2002), en el estado de Campeche la información es limitada, lo cual implica que las dosis de fertilización aplicadas por los productores al cultivo en la

mayoría de los casos obedezcan a recomendaciones empíricas, o que el agricultor utilice dosis de fertilización recomendadas para la obtención de grano en plantaciones establecidas para la producción de elote.

Por la importancia que tiene la fertilización fosfatada y el agua de riego en la calidad del elote, se planteó la realización del trabajo de investigación aquí descrito, con el objetivo principal de evaluar el efecto de diferentes dosis de fertilización fosfatada y tensiones de humedad en el suelo al momento del riego sobre la calidad del maíz elotero híbrido A-7573.

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1. Establecimiento del experimento

El experimento fue conducido de abril a julio del 2007, en el campo experimental del Colegio de Postgraduados Campus Campeche, ubicado en el Km 17.5 de la carretera federal Haltunchén-Edzná, en el municipio de Champotón del estado de Campeche, México, con coordenadas 19° 29' 55'' de latitud norte y 90° 32' 45'' de longitud oeste, a 16 msnm. La siembra del experimento se realizó el 13 de abril en una parcela con suelo Vertisol cálcico. El material vegetativo utilizado fue maíz (*Zea mays L.*) híbrido elotero A-7573, el cual fue irrigado con un sistema de riego por goteo con cintillas con goteros a cada 0.3 m. Previo al establecimiento del experimento se realizaron muestreos y análisis químicos del agua de riego y del suelo de la parcela en la que se estableció el trabajo. En este último caso se tomó una muestra compuesta (que incluyó 15 submuestras) después de la preparación del terreno para la siembra. Los

resultados del análisis químico del suelo y el modelo simplificado (Rodríguez, 1987) fueron usados para definir las dosis de fertilización de nitrógeno, fósforo y potasio. Mencionado modelo utiliza la siguiente fórmula:

$$DF = \frac{DC - SS}{EF} \quad (1)$$

Donde: DF representa la dosis de fertilización a aplicar (Kg ha^{-1}), DC la demanda de nutrimento del cultivo (Kg ha^{-1}), SS el suministro del nutrimento que aporta el suelo (Kg ha^{-1}) y EF la eficiencia que tiene el fertilizante en relación a la absorción de la planta (adimensional). Como DC depende del potencial productivo que tiene el cultivo en una región dada, para este estudio fue estimada en $24 \text{ Kg P}_2\text{O}_5$, que corresponde a la cantidad de este nutrimento que se requiere para alcanzar una producción de 12 t ha^{-1} de elote, que representa el potencial del híbrido A-7573 (Hernández *et al.*, 2001) bajo las condiciones ambientales de la región de estudio. SS mostró, de acuerdo a los resultados del análisis de fósforo, niveles muy bajos, prácticamente sin suministro, por el contrario, el Nitrógeno (N) y Potasio (K) presentaron suministros mayores a la demanda del cultivo, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000). Para la unidad de suelo Vertisol cálcico se consideró una eficiencia de fertilización del 30% (Obrador, 1991). Con base en lo antes expuesto la dosis de fertilización óptima estimada para fósforo (P_2O_5) fue de 80 Kg ha^{-1} .

3.3.2. Factores en estudio

Se estudiaron los factores tensión de humedad en el suelo al momento del riego y fertilización fosfatada. El factor tensión de

humedad tuvo cuatro niveles: -5, -30, -55 y -80 kPa, definidos con base en experiencias previas, considerando lo señalado por otros investigadores (Rhods y Stanley, 1973; Rhods y Stanley, 1974; Carrillo, 1989; Lu *et al.*, 2000; Salaya *et al.* 2002; Kang *et al.*, 2004; Baboo, 2006; Orozco y Pérez, 2006; Wang *et al.*, 2007), y tratando de explorar la respuesta del maíz a niveles húmedos y relativamente secos del suelo. El factor fertilización fosfórica tuvo tres niveles: 60, 80 y 100 Kg ha^{-1} . Para la definición de los niveles de fertilización de este elemento se definió la dosis óptima de 80 Kg ha^{-1} , (Rodríguez, 1987), explorándose además un nivel menor y otro mayor. Las dosis de fertilización de nitrógeno y potasio aplicadas fueron también estimadas con el uso del mencionado modelo, aunque para estos nutrimentos, sólo se utilizó una dosis considerando la cantidad que exportaría del sistema un rendimiento de alrededor de 12 t ha^{-1} de elote y que están alrededor de 100 Kg ha^{-1} de cada uno de estos elementos.

3.3.3. Tratamientos

La combinación de los niveles de los dos factores en estudio dio como resultado la aplicación de los 12 tratamientos que se muestran en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Tratamientos evaluados

Tensión de humedad al momento del riego (kPa)	Dosis de Fósforo (P_2O_5) (Kg ha^{-1})
-5	60
-5	80
-5	100
-30	60
-30	80
-30	100
-55	60
-55	80
-55	100
-80	60
-80	80
-80	100

3.3.4. Diseño experimental

Se utilizó un diseño en parcelas divididas (DPD), con los niveles del factor riego (tratamientos) alojados en las parcelas grandes en un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con tres repeticiones, y los niveles del factor fertilización fosfórica (subtratamientos) alojados dentro de las parcelas pequeñas en un diseño completamente al azar (DCA) (Hinkelmann y Kempthorne, 1994; Martínez, 1996).

Las parcelas grandes, de 96 m² de superficie, estuvieron constituidas por ocho hileras de plantas de 20 m de largo, con una separación de 0.6 m entre hileras y 0.3 m entre plantas, con una densidad de siembra aproximada de 55,500 plantas por hectárea. Cada parcela grande fue subdividida en tres para aplicar los subtratamientos de fertilización, por lo que el experimento estuvo conformado por 36 unidades experimentales de 32 m². La parcela útil la constituyeron los cinco metros y las seis hileras del centro de cada unidad experimental, para evitar el efecto de orilla.

3.3.5. Aplicación de los tratamientos

Los tratamientos de riego fueron iniciados el cinco de mayo cuando las plantas de maíz tenían una altura de 30 cm, previo a lo cual todas las unidades experimentales fueron irrigadas de manera homogénea cada tercer día para garantizar la germinación y emergencia de las semillas. El control de los tratamientos de riego, aplicados sobre las parcelas grandes, se realizó usando válvulas individuales conectadas en cada cintilla al inicio de las hileras de maíz. El momento de aplicación de los riegos y su duración fue determinado con base en la tensión del agua en el suelo correspondiente a cada tratamiento, medido con tensiómetros de manómetro instalados en el centro de cada parcela grande, cuya cápsula porosa se

instaló a 30 cm de profundidad, inmediatamente abajo de los emisores de la cintilla de riego. Los riegos se iniciaron cuando el manómetro del tensiómetro indicó el tratamiento de tensión de humedad en estudio y se prolongaron hasta saturar al suelo desde la superficie hasta la profundidad de la cápsula, cuando la aguja del manómetro indicó una tensión de humedad nula. La cantidad de agua aplicada en cada riego se midió con un medidor del gasto, conectado a la tubería que suministró el agua al sistema de riego.

Para establecer los tratamientos de fertilización fosfórica se aplicó superfosfato de calcio triple P₂O₅ (46%). También se aplicó una mezcla física de urea y KCl para suministrar las dosis de 100 kg de N y K de manera homogénea en todas las unidades experimentales.

3.3.6. Labores culturales

Las labores agronómicas del cultivo de maíz fueron realizadas de acuerdo al manual de producción para el estado de Campeche elaborado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 2007)

3.3.7. Control de plagas

Durante el desarrollo del experimento se observó la incidencia de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* Smith) y gusano trozador (*Agrotis spp*), plagas que fueron controladas mediante la aplicación de cipermetrina en dosis de 0.5 l ha⁻¹ sólo una vez y al momento en que las poblaciones de ambas plagas alcanzaron el umbral económico.

3.3.8. Variables evaluadas

Para evaluar el efecto de los tratamientos de riego y fertilización aplicados al cultivo

sobre las variables de calidad del elote, se determinaron las variables: peso fresco del elote sin brácteas (*PFEB*; g), peso seco del elote sin brácteas (*PSEB*; g), diámetro del elote sin bráctea (*DEB*; cm), largo de elote sin bráctea (*LEB*; cm), número de granos por elote (*NGxE*), número de granos sin llenar (*NGSLL*), número de hileras por elote (*NHxE*), peso seco de grano por elote (*PSG*; g), rendimiento en elote fresco sin brácteas (*REF*; t ha⁻¹), rendimiento en elote seco (*RES*; t ha⁻¹) e índice de cosecha (*IC*). Para definir sus valores se tomó una muestra aleatoria de diez plantas al azar en la parcela útil de cada unidad experimental, al concluir la fase de campo cuando los elotes se encontraban en estado fenológico lechoso-masoso (Hanway, 1982), determinando los valores medios de *PFEB*, *DEB*, *LEB*, *NGxE*, *NGSLL* y *NHxE* en cada unidad experimental. Para determinar *PSEB* y *PSG* los elotes fueron secados en estufa a 105 °C hasta llevarlos a peso constante. En el cálculo de *PSEB* se incluyó tanto el peso del olote como del grano secos. *REF* y *RES* se estimaron multiplicando respectivamente los valores medios de *PFEB* y *PSEB* de cada unidad experimental por el número de elotes por hectárea. Este último valor fue estimado cuantificando el número de plantas con elote en la parcela útil de cada unidad experimental y extrapolando los valores a una hectárea. El índice de cosecha se calculó para cada unidad experimental con la siguiente expresión (Paliwal, *et al.* 2001):

$$IC = \frac{PSG}{PSBA} \quad (2)$$

Donde:

IC = Índice de cosecha (adimensional)

PSBA = Peso seco de la biomasa aérea (g)

3.3.9. Eficiencia del uso del agua

Se calculó la eficiencia del uso del agua en cada unidad experimental con expresiones similares a las usadas por Lu *et al.* (2000), de la forma:

$$EUAr = \frac{REF}{Lr} \quad (3)$$

$$EUAt = \frac{REF}{Lt} \quad (4)$$

Donde:

EUAr = Eficiencia en el uso del agua de riego (t ha⁻¹ mm⁻¹)

Lr = Lámina de riego aplicada (mm)

EUAt = Eficiencia en el uso del agua total (t ha⁻¹ mm⁻¹)

Lt = Lámina de agua total recibida por el cultivo (riego más precipitación) (mm).

3.3.10. Análisis estadístico

Se realizó el análisis de varianza del diseño de parcelas divididas para todas las variables de respuesta evaluadas con el uso del paquete SAS (SAS, 2003), y las medias en las variables con diferencias estadísticas se compararon con la prueba de Tukey. También se realizaron regresiones múltiples para relacionar los valores de las variables con los niveles de tensión de humedad en el suelo al momento del riego y con los niveles de fertilización fosfórica aplicados. El modelo general probado fue:

$$y = a + bTh + cP + dTh^2 + eP^2 \quad (5)$$

Donde:

y = Variable de respuesta

Th = Tensión de humedad (kPa)

P = Fertilización fosfatada (Kg ha⁻¹)

a, b, c, d, e = Parámetros del modelo

Los parámetros del modelo fueron determinados con el paquete SAS (SAS, 2003), utilizando el procedimiento FORWARD BACKWARD STEPWISE que selecciona los coeficientes del modelo que

superan un nivel de significancia previamente establecido ($\alpha = 0.5$). En el modelo de regresión 4 no se incluyó el término $Th \times P$ correspondiente a la interacción entre la humedad del suelo al momento del riego y la fertilización, debido a que en el análisis de varianza del experimento su efecto no fue declarado significativo para ninguna de las variables de respuesta analizadas.

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1 Análisis de varianza del experimento

En el Cuadro 3.2 se presentan los niveles de significancia observados en el análisis de varianza del experimento para cada una de las variables de respuesta evaluadas. Con excepción de la variable *IC*, en la que no se

declararon diferencias estadísticas entre tratamientos de riego ni de fertilización, en el resto de variables de respuesta evaluadas se encontraron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.0001$, Cuadro 3.2) entre tratamientos de riego y entre tratamientos de fertilización, aunque en este último caso en la variable *NHxE* el efecto encontrado fue significativo al 4.42%. La falta de diferencias estadísticas entre tratamientos de riego y de fertilización en el índice de cosecha indica probablemente que, la formación de grano en el cultivo está relacionada íntimamente y es directamente proporcional a la formación de biomasa, independientemente del estrés al que se someta la planta (Bryant *et al.*, 1992; Bennouna *et al.*, 2004).

Cuadro 3.2. Niveles de significancia observados en el análisis de varianza del experimento para las variables de respuesta evaluadas. Maíz híbrido elotero A-7573 cultivado bajo cuatro tensiones de humedad en el suelo y tres dosis de fósforo en el estado de Campeche.

Fuentes de variación	Variables de respuesta											
	LEB (cm)	DEB (cm)	PFEB (gr)	PSEB (gr)	NGxE	NGSSL	NHxE	PSG (g)	REF (t ha ⁻¹)	RES (t ha ⁻¹)	IC	
Tratamientos de riego	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.4825
Bloques	<0.0001	0.3487	<0.0001	<0.0001	0.0006	<0.0001	0.0471	0.0192	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0330
Tratamientos de riego x bloques	0.0388	0.0013	0.1256	0.0002	0.0137	<0.0001	0.0056	0.2586	0.1735	0.0001	0.0001	0.0007
Tratamientos de fertilización	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0442	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.2411
Tratamientos de riego x fertilización	0.9120	0.2900	0.4827	0.9500	0.1549	0.0897	0.5403	0.8107	0.5024	0.6499	0.8576	0.8576
CV (%)	2.95	1.41	2.27	4.11	1.72	3.36	1.60	4.77	2.22	4.18	6.95	6.95

LEB=Largo del elote sin bráctea; DEB=Diámetro del elote sin bráctea; PFEB=Peso fresco del elote sin bráctea; PSEB=Peso seco del elote sin bráctea. NGxE=Número de granos por elote; NGSSL=Número de granos sin llenar; NHxE=Número de hileras por elote; PSG=Peso seco del grano por elote; REF=Rendimiento de elote fresco; RES=Rendimiento de elote seco; IC=Índice de cosecha; CV=Coefficiente de variación.

La elevada significancia de los efectos de los dos factores en estudio, muestra el claro

efecto que ambos tuvieron sobre los valores de las variables de respuesta evaluadas.

Similar al trabajo de Pérez y Cigales (2001), en ninguna variable se observó interacción entre tratamientos de riego y tratamientos de fertilización, revelador de que ambos factores actuaron de manera independiente sobre los valores de las variables, aunque en trabajos similares se han reportado interacciones entre tensiones de humedad al momento del riego y dosis de fertilización (Pérez *et al.*, 2004; Orozco y Pérez, 2006). Cabe resaltar que los coeficientes de variación fueron bastante bajos considerando que se trató de un experimento de campo (Cuadro 3.2).

3.4.2. Comparación múltiple de medias

Tratamientos de tensión de humedad

En el Cuadro 3.3 se presenta la comparación múltiple de medias para los tratamientos de riego (Tukey, $p \leq 0.01$). Se aprecia claramente que el híbrido de maíz estudiado, presenta, disminución en todas las variables

de respuesta evaluadas conforme aumenta la tensión de humedad en el suelo, con salvedad de la variable *NGSLL* que presenta la tendencia inversa y de la variable *IC*, en la que no se identificaron diferencias estadísticas significativas. Con excepción de esta última variable, en el resto el efecto de los tratamientos más húmedos (-5 y -30 kPa) fueron estadísticamente iguales, pero diferentes del efecto del tratamiento de -55 kPa, que a su vez resultó diferente del efecto del tratamiento más seco, en el que se observó el mayor valor de *NGSLL*, así como los valores promedio más bajos en el resto de variables. En contraste, el menor *NGSLL* y los mayores valores promedio en las demás variables se observaron casi siempre en el tratamiento más húmedo, aunque fueron muy similares a los encontrados en el tratamiento de -30 kPa (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Comparación múltiple de medias de las variables de respuesta. Efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego en maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche.

Variables	Tratamientos de riego				DMS
	-5 kPa	-30 kPa	-55 kPa	-80 kPa	
<i>LEB</i> (cm)	26.57 a	26.72 a	20.50 b	16.52 c	1.15
<i>DEB</i> (cm)	4.48 a	4.39 a	3.96 b	3.69 c	0.10
<i>PFEB</i> (g)	199.3 a	198.5 a	143.3 b	109.3 c	6.4
<i>PSEB</i> (g)	50.1 a	49.1 a	36.2 b	26.5 c	2.9
<i>NGxE</i>	468.8 a	467.1 a	367.8 b	296.6 c	11.9
<i>NGSLL</i>	8.61 c	9.51 c	36.13 b	47.49 a	1.48
<i>NHxE</i>	14.84 a	14.76 a	14.09 b	13.63 c	0.40
<i>PSG</i> (g)	32.1 a	31.7 a	23.9 b	18.3 c	2.2
<i>REF</i> (t ha ⁻¹)	11.06 a	11.02 a	7.16 b	3.94 c	0.32
<i>RES</i> (t ha ⁻¹)	2.78 a	2.72 a	1.81 b	0.96 c	0.15
<i>IC</i>	0.282 a	0.284 a	0.292 a	0.277 a	0.034

Medias con la misma letra en fila no son diferentes estadísticamente (Tukey; $p \leq 0.01$); DMS=Diferencia mínima significativa; *LEB*=Largo de elote sin bráctea; *DEB*=Diámetro de elote sin bráctea; *PFEB*=Peso fresco de elote sin bráctea; *PSEB*=Peso seco de elote sin bráctea; *NGxE*=Número de granos por elote; *NGSLL*=Número de granos sin llenar; *NHxE*=Número de hileras por elote; *PSG*=Peso seco del grano por elote; *REF*=Rendimiento en elotes frescos; *RES*=Rendimiento en elotes secos; *IC*=Índice de cosecha.

En las variables *LEB*, *DEB*, *PFEB*, *PSEB*, *NGxE*, *NHxE*, *PSG*, *REF* y *RES* el

tratamiento mas seco mostró una reducción promedio de 38.17%, 15.95%, 44.94%,

46.03%, 36.50%, 7.66% y 42.27%, 64.25% y 64.71% respectivamente, en relación al de -30 kPa. En contraste, la variable *NGSLL* aumentó 280% y 400% de este último tratamiento, a los más secos (-55 kPa y -80 kPa) respectivamente.

El número de hileras y el diámetro de los elotes se vieron menos afectados por el estrés hídrico, dado que para el tratamiento más seco, solo se redujeron en promedio 7.66 y 15.95% respectivamente, en relación al tratamiento de -30 kPa. En cambio, las variables más sensibles a la falta de humedad en el suelo fueron el número de granos sin llenar, que aumentó un 400%, cuando se incremento el número de riegos (-30 kPa) y el rendimiento de elote fresco y seco, se redujeron más de un 64% en promedio cuando disminuyo (-80 kPa). En el resto de variables analizadas el efecto de la escasez de agua mostró tendencias similares. La disminución en las variables *NGSLL* y *NGxE* pudo deberse en principio a la reducción de la humedad en el pistilo, variable que responde a los cambios del estatus de agua en la planta causados por la demanda evaporativa del ambiente y por el déficit de agua impuesto a la planta (Westgate y Boyer, 1986a). El déficit de agua inhibe la elongación y retrasa la emergencia del pistilo (Bassetti and Westgate, 1993), lo cual disminuye el numero de granos polinizado por mazorca como consecuencia de la deshidratación del pistilo y del polen, causando interrupción en la polinización (Herrero y Jonson, 1981; Westgate y Boyer, 1986; Westgate y Thomson 1989; Zinselmeier *et al.*, 1999; Boyer y Westgate, 2004; Moser *et al.*, 2006). Estos argumentos explican en gran parte la disminución de 36.5% en la variable *NGxE* y el drástico aumento del 400% en *NGSLL* del tratamiento de -30 kPa al más seco.

Por otra parte Outtar *et al.* (1987) y Shani y Dudley (2001) señalan que la tensión de humedad en el suelo incrementa la resistencia estomatal de la hoja de las plantas de maíz, disminuyendo la tasa de transpiración y la fotosíntesis, lo cual reduce la acumulación de biomasa total de la planta y afecta los valores de las variables *LEB* y *DEB*. En el presente estudio se encontró que la tensión de humedad afectó en mayor medida a la longitud de los elotes, que disminuyó un 38.17% del tratamiento de -30 kPa al más seco, contra solo un 7.66% de reducción en el diámetro.

La disminución del *PSG* podría deberse al decremento en el desarrollo del embrión y del almidón y proteína, los cuales se ven afectados cuando los potenciales de agua en las hojas son bajos (Westgate y Boyer, 1985). Las tensiones de humedad más altas impuestas a las plantas de maíz en los tratamientos más secos pudieron haber causado un decremento en el endospermo y en la masa final del embrión (Westgate, 1994; Bennouna *et al.*, 2004), así como en el numero de células del endospermo y de cantidad de almidón en el grano, reduciendo su peso final (Moser *et al.*, 2006). Esto podría ser también la causa de la diferencia en los valores de las variables *PFEB* y *PSEB* entre los tratamientos más húmedos con respecto a los más secos. Por otra parte, aunque se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de riego, la variable *NHxE* fue la menos afectada por el aumento en la tensión de humedad en el suelo, lo que sugiere que el número de hileras por elote está más influenciado por otros factores que por el manejo dado al cultivo.

Es de hacer notar que, a pesar de que la reducción en la longitud, el peso fresco y el número de granos por elote fue de alrededor

del 40% del tratamiento de -30 kPa al más seco, el rendimiento en elote fresco se redujo en un 64.25%, debido a que muchas de las plantas no presentaron elote en el tratamiento más seco, lo que es un indicador del claro efecto que la falta de agua en el suelo tiene sobre la cantidad y la calidad de los elotes producidos. Los rendimientos en elote fresco sin brácteas, obtenidos para los dos tratamientos más húmedos, son prácticamente iguales (Cuadro 3), superan en un 16% al promedio nacional y son tres veces superiores al rendimiento promedio estatal (ambos calculados en elotes con brácteas), lo que se obtuvo gracias al empleo de agua de riego y fertilizantes aplicados en forma adecuada y suficiente.

Numerosos estudios han documentado el efecto detrimental del estrés hídrico en el suelo sobre los órganos vegetativos y rendimiento de grano en la planta de maíz (Herrero y Jonson, 1981; Westgate y Boyer, 1985 Schoper *et al.*, 1986; Lorena *et al.*, 1987; Westgate y Thomson, 1989 Bassetti y Westgate, 1993; Schussler y Westgate, 1994; Li *et al.*, 2002; Bennouna *et al.*, 2004; Boyer y Westgate, 2004).

Tratamientos de fertilización fosfórica

En el Cuadro 3.4 se presenta la comparación múltiple de medias para los tratamientos de fertilización (Tukey, $p \leq 0.01$). Similar a lo encontrado en el factor tensión de humedad, se aprecia claramente que el híbrido evaluado presenta disminución en todas las variables de respuesta conforme disminuye la dosis de fósforo aplicada, con salvedad de la variable *NGSLL* que presenta la tendencia inversa y de la variable *IC*, en la que no se identificaron diferencias estadísticas significativas. En todas las variables de respuesta se encontró un comportamiento similar, al declararse estadísticamente

iguales los efectos de las dos dosis más altas de fósforo, pero diferentes del efecto de la dosis más baja. La excepción fueron las variables *NHxE* e *IC*, en las que no se encontraron diferencias estadísticas y la variable *NGSLL*, que presentó la tendencia inversa, los mayores valores promedio de las variables se observaron en el nivel más alto de fósforo, aunque fueron prácticamente iguales a los encontrados en el nivel de 80 Kg P₂O₅ ha⁻¹ (Cuadro 3.4), resultado que pone de manifiesto la utilidad del método conceptual para definir la dosis de fertilización en los cultivos, de hecho mencionado modelo a sido utilizado en diferentes cultivos (Galvis, 1998; Volke *et al* 1998; Bugarín, 2002 y Vidal *et al* 2002). En las variables *LEB*, *DEB*, *PFEB*, *PSEB*, *NGxE*, *NHxE*, *PSG*, *REF* y *RES* se observó una reducción de 11.33%, 4.77%, 10.02%, 17.61%, 11.03%, 1.66%, 21.07%, 9.43% y 17.05% respectivamente al disminuir la dosis de fósforo aplicada de 80 a 60 Kg P ha⁻¹ (Cuadro 3.4), contrastando con lo encontrado en la variable *NGSLL*, cuyos valores aumentaron en un 16.67%.

La deficiencia de fósforo afectó en mayor grado a las variables *PSG*, *RES* y *PSEB*, indicativo de que el suministro de dicho elemento tiene un efecto positivo en la formación de biomasa, lo que coincide con lo señalado por Arain *et al.* (1989) y Barry y Millar (1989). Estos últimos autores señalan que el número de granos por planta y el peso del grano se incrementan cuando las concentraciones de fósforo asimilable en el suelo son elevadas. Similar al factor tensión de humedad, la deficiencia de fósforo tuvo el más bajo efecto en las variables *NHxE* y *DEB*. Las variables que caracterizan la calidad del elote: *LEB*, *PFEB* y *NGxE* sufrieron reducciones de alrededor del 11% al disminuir la dosis de fósforo (P₂O₅) de 80

a 60 Kg ha⁻¹, lo que se debe fundamentalmente a que ésta última no satisfizo las demandas de fósforo de las plantas.

El efecto de los diferentes niveles de fósforo aplicados sobre el rendimiento en elote fresco fue menos marcado que el de los

niveles de humedad, observándose un aumento del 9.4% al pasar de la dosis más baja a la intermedia. No obstante, los valores promedio encontrados son muy similares al rendimiento medio nacional y duplican al promedio estatal.

Cuadro 3.4. Comparación múltiple de medias de las variables de respuesta. Efecto de diferentes dosis de fósforo en maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche.

Variables	Dosis de fósforo (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)			DMS
	60	80	100	
<i>LEB</i> (cm)	20.74 b	23.39 a	23.60 a	0.92
<i>DEB</i> (cm)	3.99 b	4.19 a	4.21 a	0.08
<i>PFEB</i> (g)	149.9 b	166.6 a	171.3 a	5.1
<i>PSEB</i> (g)	35.1 b	42.6 a	43.7 a	2.3
<i>NGxE</i>	370.2 b	416.1 a	414.0 a	9.5
<i>NGSLL</i>	28.34 a	24.29 b	23.68 b	1.18
<i>NHxE</i>	14.18 a	14.42 a	14.38 a	0.32
<i>PSG</i> (g)	22.1 b	28.0 a	29.4 a	1.7
<i>REF</i> (t ha ⁻¹)	7.68 b	8.48 a	8.72 a	0.25
<i>RES</i> (t ha ⁻¹)	1.80 b	2.17 a	2.23 a	0.12
<i>IC</i>	0.276 a	0.284 a	0.290 a	0.027

Medias con la misma letra en fila no son diferentes estadísticamente (Tukey; $p \leq 0.01$); DMS=Diferencia mínima significativa; *LEB*=Largo de elote sin bráctea; *DEB*=Diámetro de elote sin bráctea; *PFEB*=Peso fresco de elote sin bráctea; *PSEB*=Peso seco de elote sin bráctea; *NGxE*=Número de granos por elote; *NGSLL*=Número de granos sin llenar; *NHxE*=Número de hileras por elote; *PSG*=Peso seco del grano por elote; *REF*=Rendimiento en elotes frescos; *RES*=Rendimiento en elotes secos; *IC*=Índice de cosecha.

3.4.3. Análisis de regresión

En el Cuadro 3.5 se muestran las ecuaciones de regresión que relacionan los valores de las variables de respuesta con los niveles de los factores en estudio. Como se señaló en el capítulo de materiales y métodos, las ecuaciones fueron determinadas por regresión sobre los valores medios medidos en cada unidad experimental. Se seleccionaron las ecuaciones cuyos coeficientes superaron el nivel de significancia establecido ($p = 0.5$). Se descartaron las ecuaciones con ordenada al origen negativo debido a que ninguna de las

variables puede tomar valores menores de cero para un valor nulo en la dosis de fósforo y la tensión de humedad. Los valores del coeficiente de determinación fueron bastante aceptables (Cuadro 3.5).

En todas las variables se calcularon las dosis de fósforo para las cuales las variables presentan un valor máximo o mínimo en las ecuaciones, que se presentan en el Cuadro 3.5. En las variables *PSEB*, *PSG* y *RES* se encontró una relación lineal entre sus valores y la dosis de fósforo aplicada, por lo que no fue posible calcular valores extremos. En el resto de variables analizadas los extremos se presentan para dosis de fósforo que varían de

87.1 a 99 Kg ha⁻¹ (Cuadro 3.5). Por otra parte, por lo que respecta al factor tensión de humedad, los valores extremos en todas las variables se presentaron, de acuerdo a las ecuaciones de regresión, para una tensión de humedad nula, motivo por el cual no aparece una columna para dicha variable en el Cuadro 3.5. Por ello, en dicho Cuadro el valor máximo o mínimo para las variables, que aparece en la última columna, fue calculado usando la dosis de fósforo de la penúltima columna, considerando un valor

nulo en la tensión de humedad. Dado que a una tensión de humedad nula (suelo saturado de agua) el rendimiento esperado en elote sería también nulo, para poder definir la tensión de humedad óptima para el riego del cultivo será necesario estudiar con mayor detalle el efecto de tensiones de humedad cercanas de saturación a fin de obtener resultados más precisos, así como explorar otros modelos de regresión que se ajusten mejor a los datos experimentales.

Cuadro 3.5. Ecuaciones de regresión obtenidas para las variables de respuesta.

Variable	Ecuación	r ²	Dosis de P para valor extremo (Kg ha ⁻¹)	Valor extremo
LEB (cm)	$LEB = 2.5589 + 0.5598 P - 0.00171 Th^2 - 0.00305 P^2$	0.911	91.8	28.2 [†]
DEB (cm)	$DEB = 2.7299 + 0.00494 Th + 0.04098 P - 0.0000733 Th^2 - 0.0002219 P^2$	0.925	92.3	4.6 [†]
PFEB (g)	$PFEB = 69.214 + 0.172867 Th + 2.94313 P - 0.0132756 Th^2 - 0.0150521 P^2$	0.936	97.8	213.1 [†]
PSEB (g)	$PSH = 33.2784 + 0.21621 P - 0.00391 Th^2$	0.829	NC	NC
NGxE	$NGxE = 19.4043 + 10.6938 P - 0.02891 Th^2 - 0.0600 P^2$	0.949	89.1	495.9 [†]
NGSLL	$NGSLL = 41.025 - 0.21753 Th - 0.55194 P + 0.0041822 Th^2 + 0.004292 P^2$	0.903	93.6	3.4 [‡]
NHxE	$NHxE = 12.339 + 0.004733 Th + 0.061667 P - 0.0001467 Th^2 - 0.0003542 P^2$	0.733	87.1	15.0 [†]
PSG (g)	$PSG = 17.8614 + 0.1824 P - 0.0023 Th^2$	0.912	NC	NC
REF (t ha ⁻¹)	$REF = 5.0639 + 0.13635 P - 0.00119 Th^2 - 0.000689 P^2$	0.965	99.0	11.81 [†]
RES (t ha ⁻¹)	$RES = 1.9981 + 0.01062 P - 0.0003018 Th^2$	0.901	NC	NC

Th=Tensión de humedad en el suelo (kPa). P=Dosis de fósforo (Kg ha⁻¹). NC=No se puede calcular en la ecuación obtenida. LEB=Largo de elote sin bráctea; DEB=Diámetro de elote sin bráctea; PFEB=Peso fresco de elote sin bráctea; PSEB=Peso seco de elote sin bráctea; NGxE=Número de granos por elote; NGSLL=Número de granos sin llenar; NHxE=Número de hileras por elote; PSG=Peso seco del grano por elote; REF=Rendimiento en elotes frescos; RES=Rendimiento en elotes secos; IC=Índice de cosecha; †Valor máximo en la variable de acuerdo a la ecuación; ‡Valor mínimo en la variable de acuerdo a la ecuación.

En las Figuras 3.1 y 3.2 se ilustra el efecto de la fertilización fosfatada sobre los valores de *LEB* y *DEB* respectivamente, en las que se graficaron los modelos de regresión obtenidos para ambas variables con la fertilización como variable independiente, incluyendo una curva para cada nivel de tensión de humedad. Por el comportamiento de los valores determinados experimentalmente, en las figuras se aprecia

la falta de interacción entre los factores tensión de humedad y fertilización fosfatada. Es claro el efecto que los dos factores tienen sobre los valores de las dos variables, cuyos máximos se obtuvieron a menor tensión de humedad y mayor dosis de fertilización, aunque en ambos factores los efectos de los tratamientos más húmedos y con más fertilizante resultaron iguales estadísticamente.

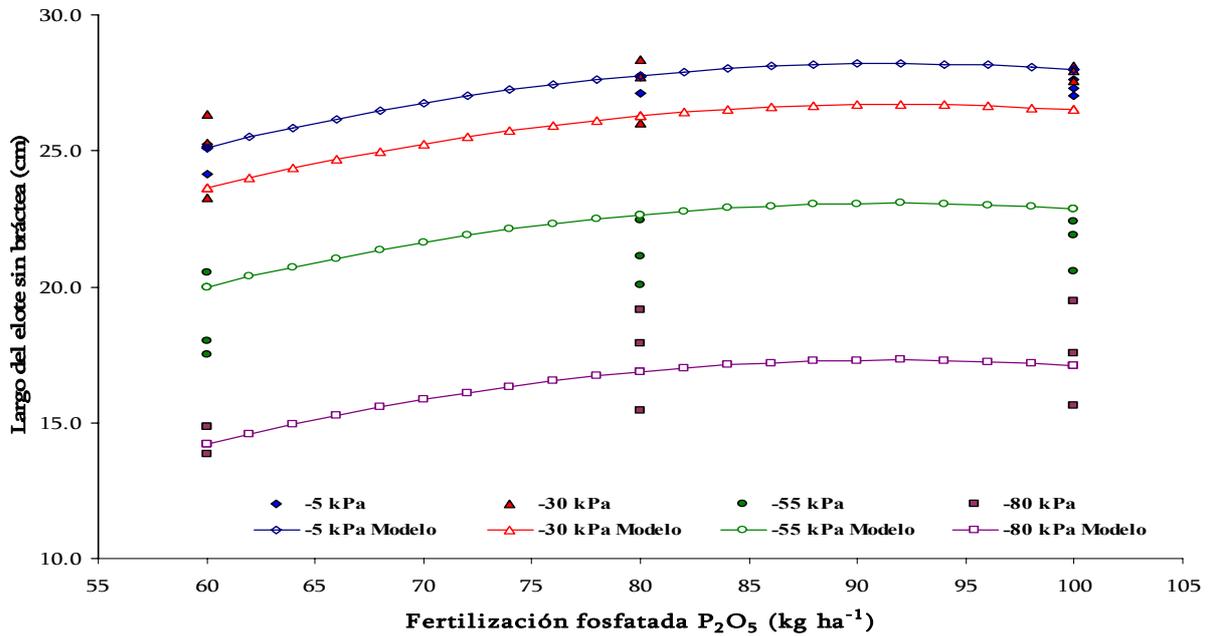


Figura 3.1. Efecto de la dosis de fertilización fosfatada y la tensión de humedad en el suelo sobre el largo del elote sin bráctea en plantas de maíz híbrido elotero A-7573.

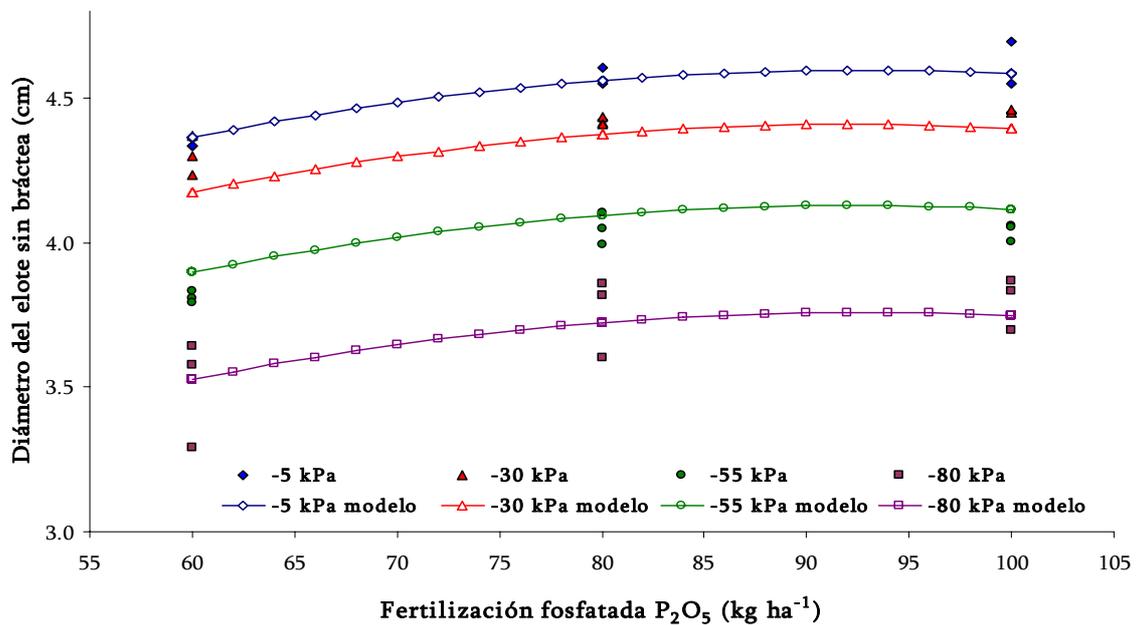


Figura 3.2. Efecto de la dosis de fertilización fosfatada y la tensión de humedad en el suelo sobre el diámetro del elote sin bráctea en plantas de maíz híbrido elotero A-7573.

En la variable *LEB* el valor máximo promedio esperado de acuerdo a la ecuación obtenida es de 28.2 cm para una dosis de fertilización de 91.8 Kg ha⁻¹ de P₂O₅ y una tensión de humedad nula, y en la variable *DEB* se esperaría obtener un valor máximo de 4.6 cm en la variedad de maíz utilizada para una dosis muy similar (92.3 Kg ha⁻¹ de P₂O₅, Cuadro 3.5). En ambas figuras puede apreciarse que el aumento en la tensión de humedad implica una reducción drástica en los valores de las dos variables, más marcada aún que la reducción ocasionada por la disminución en la dosis de fertilización fosfatada. Por otra parte, en las Figuras 3.3 y 3.4 se grafica el efecto de la

tensión de humedad como variable independiente sobre los valores de las variables *PFEB* y *NGSLL* respectivamente, incluyendo también tres curvas, una para cada nivel de fertilización fosfórica. En ambas figuras se aprecia el drástico efecto que el aumento en la tensión de humedad tiene sobre los valores de ambas variables. Como fue señalado previamente, el aumento en la tensión de humedad de -5 a -80 kPa prácticamente reduce a la mitad el peso fresco de los elotes y a casi 10 veces el número de granos sin llenar. En ambas variables, el efecto de las dosis más altas de fósforo es prácticamente el mismo (estadísticamente iguales en los dos casos).

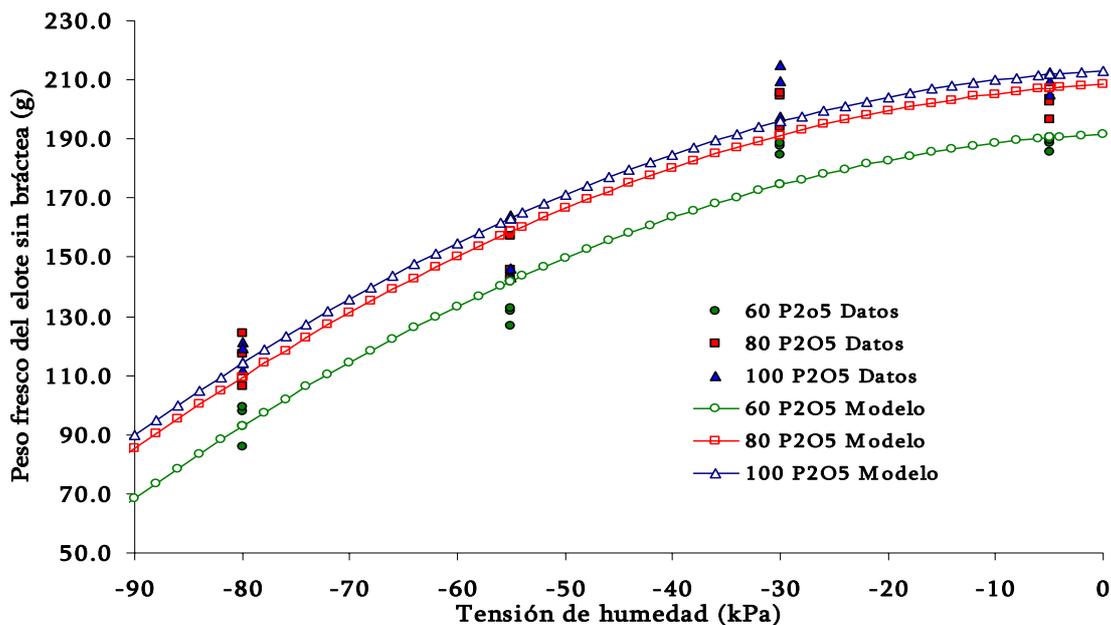


Figura 3.3. Efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego y la fertilización fosfatada sobre el peso del elote en plantas de maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche.

De acuerdo con las ecuaciones de regresión, el peso fresco máximo promedio de los elotes sin bráctea y el número de granos sin llenar promedio esperados para la variedad de maíz utilizada son de 213.1 g y 3.4, con

dosis de 97.8 y 93.6 Kg ha⁻¹ de P₂O₅ respectivamente a una tensión de humedad nula (Cuadro 3.5). Sin embargo, cabe señalar que en la Figura 3.3 se aprecia que a -30 kPa se obtuvieron valores ligeramente mayores

en *PFEB* que los observados a -5 kPa, mencionadas diferencias no se pudieron

valorar a través el modelo cuadrático.

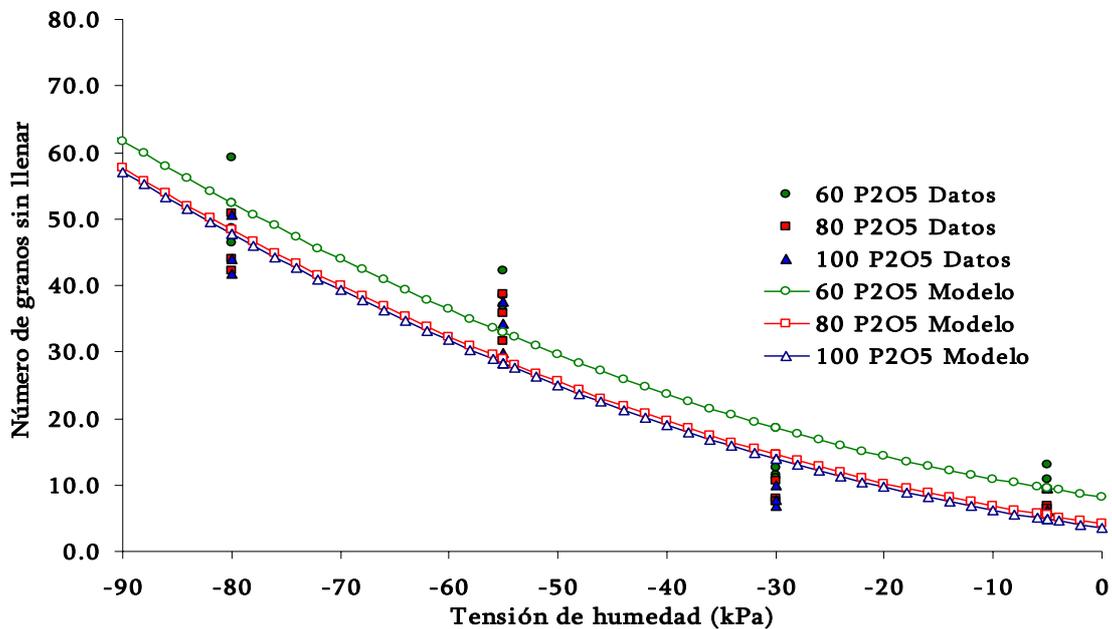


Figura 3.4. Efecto de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego y la fertilización fosfatada sobre el número de granos sin llenar en plantas de maíz híbrido elotero A-7573 en el estado de Campeche.

En la Figura 3.5 se muestra la representación gráfica del modelo de regresión encontrado para la variable rendimiento en elote fresco ($t\ ha^{-1}$) como función de la tensión de humedad en el suelo al momento del riego y de la fertilización fosfatada, construida calculando curvas de isovalores de la variable. Aunque Sharpley y Reed (1982) señalan que el efecto del estrés hídrico disminuye cuando se incrementan las dosis de fósforo, las curvas de isorendimiento en la Figura 3.5 tienden a ser paralelas al eje de las ordenadas conforme la tensión de humedad aumenta, lo que indica que el efecto de la adición de fertilizante es menor cuando el suelo está más seco y mayor cuando se humedece. Estos resultados muestran que lo señalado por los autores arriba citados es válido siempre que exista humedad en el suelo, así sea poca. A pesar

de la relación encontrada entre la humedad del suelo y el efecto de la adición de fertilizante fosfatado, la interacción fertilización-tensión de humedad no resultó significativa en el análisis de varianza del experimento.

Líneas imaginarias perpendiculares a las curvas de isovalores en la Figura 3.5 definen trayectorias que maximizan la ganancia en rendimiento. El valor máximo en la variable, de $11.81\ t\ ha^{-1}$, se localiza a una tensión de humedad nula con una dosis de fertilización de $99\ Kg\ ha^{-1}$ de fósforo (Cuadro 3.5). Dado que a una tensión de humedad nula el suelo se encuentra saturado de agua, el rendimiento en esas condiciones esperado es también nulo, por lo que es necesario estudiar con más detalle el efecto de tensiones de humedad cercanas a saturación para construir modelos más precisos que

permitan calcular la tensión de humedad a la que se deben aplicar los riegos para

maximizar el rendimiento en elote.

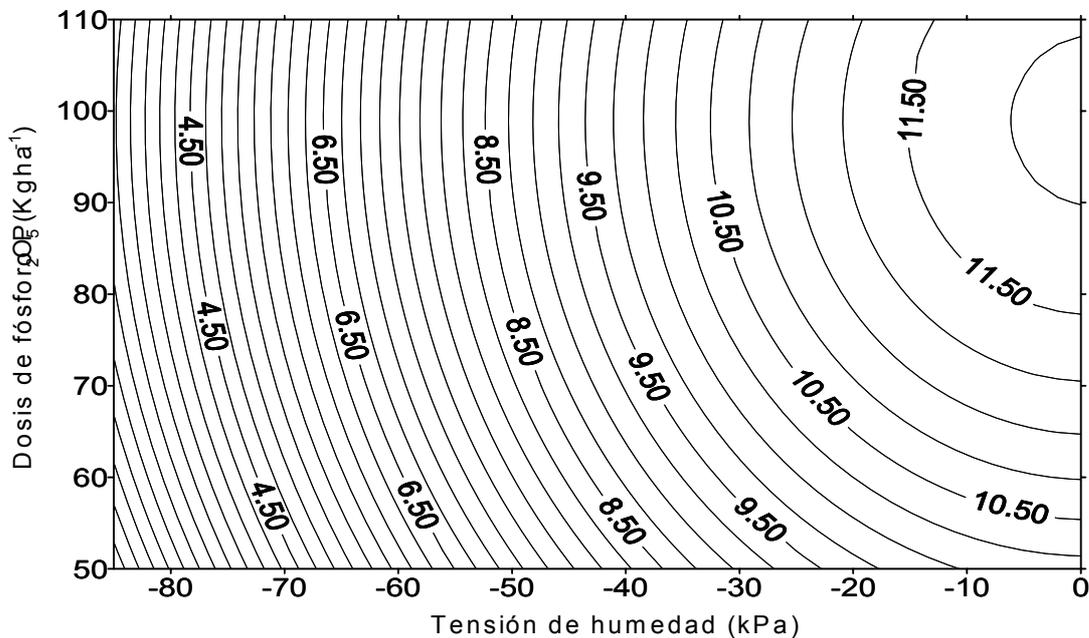


Figura 3.5. Efecto de la dosis de fertilización fosfatada y la tensión de humedad en el suelo sobre el rendimiento en elote fresco (t ha⁻¹) en plantas de maíz híbrido elotero A-7573.

3.4.4. Eficiencia en el uso del agua

En el Cuadro 3.6 se muestra el número de riegos promedio aplicado en cada tratamiento de tensión de humedad, desde la siembra hasta la cosecha de los elotes, así como la lámina de riego (L_r) media y la lámina de agua total (L_t) que recibió cada tratamiento. La diferencia entre la lámina de riego y la lámina total es la lluvia que se presentó en el área experimental, que ascendió a 50.4 mm durante el período de realización del trabajo. Se incluyen los riegos y las cantidades de agua que fueron aplicados de manera uniforme en la parcela experimental tres veces por semana desde la siembra, el 13 de abril, hasta el inicio de la aplicación de los tratamientos de tensión de humedad, el 5 de mayo, así como los riegos

y cantidades de agua aplicados a partir de esta última fecha y hasta la conclusión del trabajo.

En el Cuadro 3.6 se aprecia que la máxima eficiencia en el uso del agua se obtuvo para el tratamiento de tensión de humedad de -30 kPa, 10.75%, 21.97% y 46.25% más grande que las eficiencias encontradas para los tratamientos de -55 kPa, -5 kPa y -80 kPa respectivamente. Es de hacer notar que en el tratamiento más húmedo se encontró la tercera mejor eficiencia en el uso del agua, debido fundamentalmente a la mayor cantidad de agua necesaria para mantener la tensión de humedad más cerca de saturación, que impactó en menor medida el valor del rendimiento en elote fresco.

Cuadro 3.6. Valores promedio del número de riegos, lámina de riego, lámina total, rendimiento en elote fresco, eficiencia del uso del agua de riego y eficiencia del uso del agua total para cada tratamiento de riego.

Tratamiento de riego	Número promedio de riegos	<i>Lr</i> (mm)	<i>Lt</i> (mm)	<i>REF</i> (t ha ⁻¹)	<i>EUA_r</i> (t ha ⁻¹ mm ⁻¹)	<i>EUA_t</i> (t ha ⁻¹ mm ⁻¹)
-5 kPa	39.7	493.6	544.0	11.06	0.02241	0.02034
-30 kPa	21.3	403.1	453.5	11.0	0.02734	0.02430
-55 kPa	15.7	290.0	340.4	7.2	0.02468	0.02103
-80 kPa	12.7	210.9	261.3	3.9	0.01869	0.01509

3.5. CONCLUSIONES

Las variables de respuesta para evaluar la calidad del elote mostraron efectos altamente significativos ($p \leq 0.0001$) a las diferentes tensiones de humedad en el suelo al momento del riego, así como a los niveles de fertilización fosfatada, con excepción del número de hileras por elote, donde el efecto fue significativo al 4.42%.

El índice de cosecha no mostró diferencias estadísticas entre tratamientos ni de riego ni de fertilización, lo que sugiere que la formación de grano en el cultivo está íntimamente relacionada con la formación de biomasa.

En todas las variables con diferencias estadísticas significativas, los efectos de los tratamientos más húmedos (-5 y -30 kPa) y con mayor dosis de fertilización fosfatada (80 y 100 Kg ha⁻¹) fueron estadísticamente iguales, diferentes significativamente del resto de los tratamientos. En estos últimos se observó un menor llenado de grano.

El estrés hídrico y la deficiencia de fósforo afectaron de menor manera el número de hileras y el diámetro de elote y, en forma más pronunciada, el llenado de grano y el rendimiento de elote fresco y seco.

El fósforo tuvo un efecto significativo en la formación de biomasa, ya que su deficiencia afectó notablemente a las variables: peso

seco de grano, de elote sin brácteas y rendimiento de elote seco.

Los valores de las variables que caracterizan la calidad del elote: longitud, peso fresco y número de granos por elote, fueron alrededor de 40% más altos en el tratamiento de mayor tensión de humedad con respecto al de -30 kPa, y 11% más altos con la dosis de 80 Kg ha⁻¹ con relación a la de 60 Kg ha⁻¹ de P₂O₅.

De los modelos de regresión cuadráticos obtenidos, se determinaron dosis de fertilización de 87.1 a 99.0 Kg ha⁻¹ de P₂O₅, las cuales minimizan el número de granos sin llenar y maximizan los valores del resto de variables de respuesta evaluadas.

La mayor eficiencia en el uso del agua de riego se encontró en el tratamiento de tensión de humedad de -30 kPa. Dado que los valores encontrados en este tratamiento, en todas las variables de respuesta evaluadas, fueron muy similares y estadísticamente iguales a los observados en el tratamiento de -5 kPa.

3.6 LITERATURA CITADA

1. Ali, J., Bakht, J., Shafi, M., Khan, S y Shah, W.A. 2002. Effect of various levels of N y P on yield and yield components of maize. Pakistan Journal of agronomy 1(1):12-14.
2. Arain, A.S., Alam, S.M y Tunoo, A.K. 1989. Performance of maize genotypes under

- varying NP fertilizer environments. *Sarhad J. Agric.*, 5:623-626.
3. Bassetti, P y Westgate, M. E. 1993. Water deficit affects receptivity of maize silos. *Crop Sci.* 33: 279-282.
 4. Barry, D. A. J y Millar, M.H. 1989. Phosphorus nutritional requirement of maize seedlings for maximum yield. *Agron. J.* 81: 95-99.
 5. Bennouna, B., Lahrouni, A., Bethenod, O., Fournier, C., Andrieu, B. y Khabba, S. 2004. Development of maize internode under drought stress. *Journal of agronomy* 3(2) 94-102.
 6. Boyer, J. S y Westgate, M. E. 2004. Grain yields wint limited water. *Journal of experimental Botany*, Vol. 55 N0 407: 2385-2394.
 7. Borrero, C., F. Peña, and J. Torrent. 1988. Phosphate sorption by calcium carbonate in some soils of the Mediterranean part of Spain. *Geoderma* 42:261-269.
 8. Bryant, K. J., Benson, V.W., Kiniry, J.R., Williams, J.R., Lacewell, R.D. 1992. Simulating corn yield response to irrigation timings: validation of the Epic model. *J.Prod. Agric.* 5: 237-242.
 9. Bugarín, M. R. 2002. Simulación de la demanda y suministro edáfico en tomate. Tesis de Doctor en Ciencias. Ciencias Agrícolas y Forestales. Universidad de Colima. Colima, México. 177 p.
 10. Colomb, B.; Kiniry, J. R. y Debaeke, P. 2000. Effect of soil phosphorus on leaf development and senescence dynamics of field-grown maize. *Agron. J.* 92: 428-435.
 11. Elliott G. C y Läuchli, A. 1985. Phosphorus efficiency and phosphate-iron interaction in Maize. *Agron. J.* 77:399-403.
 12. Galvis, S. A. 1998. Diagnóstico y simulación del suministro de nitrógeno edáfico para cultivos anuales. Tesis de Doctor en Ciencias. IRENAT. Colegio de Postgraduados, Montecillos, México. 327 p.
 13. Hanway, J.H. 1982. How a corn plant develops. Special Report no 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. Ames, Iowa, E. U. A. 21 Pag.
 14. Hajabbasi, M. A y Schumacher, T. E. 1994. Phosphorus effects on root growth and development in two maize genotypes. *J. Plant and Soil.* 158: 39-46
 15. Herrero, M. P y Jonson, R. R. 1981. Drought stress and its effect on maize reproductive systems. *Crop Sci.* 21:105-110.
 16. Hedley, M. J., and M. J. McLaughlin. 2005. Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soils. P. 181-252. In J.T. Sims and A.N. Sharpley (ed.) *Phosphorus: Agriculture and the environment.* Agron. Monogr. No. 46. ASA, CSSA, and SSSA. Madison, WI.
 17. Hernández, A.J.A., Ramiro, C.A., Maya, H.V., Chaverría, C.J y Martínez, G.M. 2001. El cultivo de maíz para elote en la zona media de San Luis Potosí. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), CIR-Centro de Investigación Regional del Noreste, Campo Experimental las Palmas. Folleto Núm. 26 pp 5-13.
 18. INEGI. 2007. Sistemas Nacionales Estadístico y de Información Geográfica. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). México. <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/esp/anol/estados/camp/precipit.cfm>.
 19. INIFAP. 2007. Paquetes tecnológicos para maíz de temporal (ciclo agrícola primavera-verano), Para condiciones de alto, medio y bajo potencial productivo. México, D.F. 49 p.
 20. Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second edition. Academic

- press. Harcourt brace y company, publishers. London. San Diego. New York. Boston. Sydney. Tokyo.p:265-277.
21. Moser, S. B., Feil, B., Jampatong, S y Stamp, P. 2006. Effects of pre-anthesis drought, nitrogen fertilizer rate, and variety on grain yield, yield components, and harvest index of tropical maize. *Agricultural Water Management*. 81:41-58.
 22. Mc Beath, T. M., Smernik, R. J., Lombi, E y McLaughlin, M. J. 2006. Hydrolysis of Pyrophosphate in a Highly Calcareous Soil: A Solid-State Phosphorus-31 NMR Study. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:856–862.
 23. NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT. México. 88 p.
 24. Obrador O., J.J. 1991. Dinámica del fósforo en unidades de suelos del estado de Tabasco. Tesis Profesional. Universidad Veracruzana. Orizaba, Veracruz, México.
 25. Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E y Unland-Weiss, H. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia* 40:13-25.
 26. Lindsay, W. L. 1979. Phosphates. p. 162–205. In W.L. Lindsay (ed.) *Chemical equilibria in soils*. John Wiley & Sons, New York.
 27. López, M. J.D y Salazar, S. E. 1998. Comparación de genotipos de maíz bajo condiciones deficientes de humedad en el suelo. *Terra*.16(4): 331-335.
 28. Tisdale, S.L., Nelson, L., Beaton, J.B y Havlin, J. L. 1997. *Soil fertility and fertilizer*. 5 th Ed. Prentice Hall of India Pvt. Ltd., New Delhi. 110001. p. 203-204.
 29. Li, Y., Fuchs, M., Cohen, S., Cohen y Wallach, R. 2002. Water uptake profile response of corn to soil moisture depletion. *Plant, Cell and Environment*. 25:491-500.
 30. Lorena, G.F., Bennett, J.M. and Loggale, L.B. 1987. Differences in drought resistance between two corn hybrids. II. Component análisis and growth rates. *Agron. J.* 79: 808-813.
 31. Lu, J., Ookawa, T. and Hirasawa, T. 2000. The effects of irrigation regimes on the water use, dry matter production and physiological responses of paddy rice. *Plant and soil*. 223: 207-216.
 32. Ouattar, S., Jones, R.J., Crookston, R. K y Kajeiou, M. 1987. Effect of drought on water relations of developing maize kernels. *Crop Sci.* 27:730-735.
 33. Paliwal, R.L.; Granados, G.; Lafitte, R. H. 2001. *El Maíz en los Trópicos: Mejoramiento y producción*. Dirección de Producción y Protección Vegetal de la FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
 34. Pellerin, S.; Mollier, A y Plénet, D. 2000. Phosphorus deficiency affects the rate of emergente and number of maize adventitious nodal roots. *Agron. J.* 92: 690-697.
 35. Rodríguez, S. J. 1987. Desarrollo de normas de fertilización para el cultivo de maíz y la cebada en el estado de Tlaxcala. Colegio de Postgraduado Montecillo, México.
 36. SAS. 2003. *Statistical Analysis System for Windows 9.1.3. Service pack 2*. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
 37. Schussler y Westgate, 1994. Increasing assimilate reserves does not prevent kernel abortion at low water potential in maize. *Crop Sci.* 34: 1569-1576.
 38. Schoper, J.B., Lambert, R.J y Vasilas, B.L. 1986. Maize pollen viability and ear receptivity under water and high temperature stress. *Crop Sci.* 26:1029-1033.
 39. Sharpley, A. N y Reed, L. W. 1982. Effect of environmental stress on the growth and amounts and forms of phosphorus in plants. *Agron. J.* 74. 19-22.

40. Vidal, I., Etchevers, J. y fischer, A. 2002. Dinámica del nitrógeno bajo diferentes rotaciones, sistemas de labranza y manejo de residuos en el cultivo de trigo. *Agric. Téc.* 62 (1): 121-132.
41. Volke, H. V., Etchevers, B. J., San Juan, R. A., y Silva, P. T. 1998. Modelo de balance nutrimental para la generación de recomendaciones de fertilización para cultivos. *Terra.* 16(1): 79-91.
42. Westgate, M.E y Boyer, J.S. 1986. Reproduction at low silk and pollen water potentials in maize. *Crop Sci.* 26:951-956.
43. Westgate, M.E y Thomson, G.D.L. 1989. Water deficits and reproduction in maize. Response of the reproductive tissue to water deficits at anthesis and mid-grain fill. *Plant Physiol.* 91: 862-867.
44. Westgate, M.E, 1994. Water status and development of the maize endosperm and embryo during drought. *Crop Sci.* 34: 76-83.
45. Westgate, M.E y Boyer, J.S. 1986a. Silk and pollen water potentials in maize. *Crop Sci.* 26:947-950.
46. Westgate, M.E y Boyer, J.S. 1985. Carbohydrate Reserves and Reproductive Development at Low Leaf Water Potentials in Maize. *Crop Sci.* 25: 762- 769.
47. Zinselmeier, C., Byeong-Ryong, J y Boyer, J.S. 1999. Starch and the control of kernel number in maize at low water potentials. *Plant physiology.* 121:25-35.

CAPÍTULO IV

**Efecto de la tensión de humedad en el suelo sobre la
fenología del maíz elotero (*Zea mays* L.) Híbrido A-7573, en
el sur del Estado de Campeche**

Efecto de la tensión de humedad en el suelo sobre la fenología del maíz elotero (*Zea mays* L.) Híbrido A-7573, en el sur del estado de Campeche

Benigno Rivera-Hernández¹, Eugenio-Carrillo Ávila², José Jesús Obrador-Olán^{1*}, José Francisco Juárez-López¹, Lorenzo A. Aceves-Navarro¹

Colegio de Postgraduados: ¹Campus Tabasco, Periférico Carlos A. Molina s/n. H. Cárdenas, Tabasco, México; ²Campus Campeche, Calle Nicaragua No 91 Tercer Piso,

4.1. RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de la tensión de humedad en el suelo sobre el comportamiento fenológico del maíz elotero Híbrido A-7573 en condiciones de riego controlado. Se aplicaron cuatro diferentes tratamientos de tensión de humedad en el suelo, regándose al cultivo cuando la tensión aumentó a -5 kPa, -30 kPa, -55 kPa y -80 kPa. Se usaron tensiómetros de manómetro para medir la tensión de humedad en el suelo, cuya cápsula fue instalada a 30 cm de profundidad inmediatamente por debajo de la cinta de riego. Se evaluaron nueve etapas fenológicas: tres vegetativas (V6, V9 y V12) y seis reproductivas (R1, R2, R3, R4, R5 y R6). Los resultados revelan que entre los tratamientos más húmedos, no existió diferencia observable en el tiempo a la aparición de las etapas fenológicas correspondientes tanto al desarrollo vegetativo como reproductivo, ni en el número de grados días de desarrollo requeridos (GDD₁₀). En cambio, en los tratamientos correspondientes a las tensiones más altas, existieron diferencias observables en el tiempo a la aparición de las etapas fenológicas correspondientes tanto al desarrollo vegetativo como reproductivo, así como en la acumulación de los GDD₁₀, tanto entre ellas, como con los tratamientos más húmedos. La deficiencia de humedad en el suelo retrasó la aparición de las etapas fenológicas correspondientes al desarrollo vegetativo, pero aceleró la aparición de las etapas fenológicas del desarrollo reproductivo. De manera global la cosecha del cultivo se retrasó cuatro y seis días en los tratamientos de -55 y -80 kPa respectivamente con relación a los tratamientos húmedos.

Palabras clave: Tensión de humedad en el suelo, fenología, maíz elotero.

4.2. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la evolución de las etapas fenológicas del maíz es importante en algunos procesos prácticos de la agronomía, debido a que simplifica la elaboración de programas de riego (Kar y Verma, 2005) y facilita la programación de actividades agrícolas (Kiniry y Bonhomme, 1991) al conocer la fecha en la que se presentarán diversos procesos fisiológicos. Permite predecir además la disminución en el

rendimiento durante la fase de floración y llenado de grano por estrés biótico y abiótico (Hodges, 1991), así como establecer la fecha de cosecha, y definir la época más adecuada para la siembra.

Bajo condiciones de campo, la tasa de desarrollo del cultivo de maíz puede modificarse por factores diversos como el fotoperiodo, la humedad en el suelo, la radiación solar y la fertilidad, pero es principalmente afectada por la temperatura (Hodges, 1991). Sin embargo, el déficit de

agua en alguna etapa del crecimiento de la planta afecta muchos procesos anatómicos, morfológicos, fisiológicos y bioquímicos (Kramer, 1983). Al respecto, Doraiswamy y Thompson (1982) y Dale y Daniels (1995) argumentan que el estrés hídrico durante el desarrollo temprano de la planta de maíz retarda la floración y la madurez. Wong *et al.* (1983) observaron que el estrés hídrico adelantó 2.2 días la floración promedio en 49 genotipos de sorgo y disminuyó la duración de la floración, y Bennouna *et al.* (2004) reportan que la aparición de la lígula en la hoja se retrasa por efecto del estrés hídrico. Además, Bolaños y Edmeades (1993) afirman que el déficit de agua reduce la fotosíntesis debido a que las plantas cierran sus estomas. Cuando esta reducción ocurre durante el desarrollo y crecimiento de las estructuras reproductivas del maíz, el jilote resulta más afectado que la espiga, pues se retrasa la expansión de los estigmas, lo que aumenta el intervalo de la floración (Salinas *et al.*, 1993) presentándose una asincronía en la floración.

Por su parte Soler *et al.* (2007) mencionan que los maíces híbridos difieren entre ellos en el tiempo a la madurez, y es posible que el estrés hídrico afecte los diferentes periodos fenológicos. Muchos estudios muestran que las cosechas de grano de maíz son sensibles al estrés por humedad en un periodo comprendido aproximadamente entre la floración y el llenado de grano (Smith y Ritchie, 1992; Norwood, 1995; Norwood y Currie, 1997; Kipkorir *et al.*, 2002)

En el sureste de México, la información disponible sobre estudios fenológicos en maíz elotero es limitada, por ello, considerando su importancia, se planteó el presente trabajo de investigación, cuyo objetivo fue evaluar el efecto de la tensión

de humedad en el suelo al momento del riego sobre el comportamiento fenológico del maíz elotero híbrido A-7573 en condiciones de riego controlado.

4.3 MATERIALES Y METODOS

4.3.1. Establecimiento del experimento

El experimento fue conducido de abril a julio del 2007 en el campo experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Campeche, el cual se ubica en el kilómetro 17.5 de la carretera federal Haltunchén-Edzná, en el municipio de Champotón, Estado de Campeche, México, cuyas coordenadas son: 19°29'55'' de latitud norte y 90°32'45'' de longitud oeste. La siembra del experimento se realizó el 13 de abril en una parcela con suelo Vertisol cálcico; el material vegetativo utilizado fue maíz elotero (*Zea mays* L.) híbrido A75-73, el cual fue irrigado con un sistema de goteo con cintillas.

4.3.2. Factores en estudio

Se estudiaron los factores tensión de humedad en el suelo al momento del riego y fertilización fosfatada, aunque en el presente estudio solo se evaluó el efecto de la tensión de humedad en el suelo sobre la fenología del cultivo. El factor tensión de humedad tuvo cuatro niveles: -5, -30, -55 y -80 kPa, definidos con base en experiencias previas, considerando lo señalado por otros investigadores (Rhods y Stanley, 1973; Rhods y Stanley, 1974; Carrillo, 1989; Lu *et al.*, 2000; Salaya *et al.* 2002; Kang *et al.*, 2004; Baboo, 2006; Orozco y Pérez, 2006; Wang *et al.*, 2007), y tratando de explorar la respuesta del maíz a niveles húmedos y relativamente secos del suelo. El factor fertilización fosfórica tuvo tres niveles: 60, 80 y 100 kg ha⁻¹. Para la definición de los

niveles de fertilización de este elemento se usó el modelo simplificado para estimar dosis de fertilización (Rodríguez, 1988), con base en el cual se definió la dosis óptima de 80 kg ha⁻¹, explorándose además un nivel menor y otro mayor. Las dosis de fertilización de nitrógeno y potasio aplicadas fueron también estimadas con el uso del mencionado modelo, aunque para estos nutrimentos sólo se utilizó la dosis óptima. Una descripción más detallada de la fertilización aplicada al cultivo puede encontrarse en Rivera *et al.* (2008).

4.3.3. Tratamientos

La combinación de los niveles de los dos factores en estudio dio como resultado la aplicación de los 12 tratamientos que se muestran en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Tratamientos evaluados

Tensión de humedad (kPa)	Dosis de Fósforo (P ₂ O ₅) (kg ha ⁻¹)
-5	60
-5	80
-5	100
-30	60
-30	80
-30	100
-55	60
-55	80
-55	100
-80	60
-80	80
-80	100

4.3.4. Diseño experimental

Se utilizó un diseño en parcelas divididas (DPD), donde los niveles del factor riego (tratamientos) fueron alojados en las parcelas grandes en un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con tres repeticiones, y los niveles del factor fertilización fosfórica (subtratamientos)

fueron alojados dentro de las parcelas grandes en un diseño completamente al azar (DCA) (Hinkelmann y Kempthorne, 1994; Martínez, 1996).

Las parcelas grandes, de 96 m² de superficie, estuvieron constituidas por ocho hileras de plantas de 20 m de largo, con una separación de 0.6 m entre hileras y 0.3 m entre plantas, con una densidad de 55,500 plantas ha⁻¹. Cada parcela grande fue subdividida en tres para aplicar los subtratamientos de fertilización, por lo que el experimento estuvo conformado por 36 unidades experimentales de 32 m².

4.3.5. Aplicación de los tratamientos

El control de los tratamientos de riego, aplicados sobre las parcelas grandes, se realizó mediante válvulas individuales conectadas en cada cintilla al inicio de las hileras de maíz con goteros a cada 0.3 m de distancia. El momento de aplicación de los riegos fue determinado de acuerdo a la tensión del agua en el suelo correspondiente a cada tratamiento, estimada con tensiómetros de manómetro instalados en el centro de cada parcela grande, cuya cápsula porosa se instaló a 0.3 m de profundidad inmediatamente por debajo de la cinta de riego. Los tratamientos de riego fueron iniciados el 5 de mayo cuando las plantas de maíz tenían una altura de 0.3 m, previo a lo cual todas las unidades experimentales fueron irrigadas de manera homogénea para garantizar la germinación y emergencia de las semillas. Para establecer los tratamientos de fertilización se utilizó una mezcla física de urea, cloruro de potasio y superfosfato de calcio triple. Dada la reactividad del P y la dinámica del N se fraccionó en dos el fertilizante: la primera fertilización se hizo a la siembra y la segunda 20 días después de la primera.

4.3.6. Labores culturales

Las labores agronómicas del cultivo de maíz fueron realizadas de acuerdo a las recomendaciones del paquete tecnológico de producción de maíz para el estado de Campeche (INIFAP, 2007).

4.3.7. Control de plagas

Durante el desarrollo del experimento se observó la incidencia de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* Smith) y gusano trozador (*Agrotis spp*), plagas que fueron controladas mediante la aplicación de cipermetrina en dosis de 0.5 L ha⁻¹ aplicadas una sola vez y al momento en que las poblaciones de ambas plagas alcanzaron el umbral económico.

4.3.8. Etapas fenológicas evaluadas

El efecto de la tensión de humedad sobre la fenología fue analizado en el tratamiento donde se aplicó la dosis de fertilización de 80 kg P₂O₅ ha⁻¹, debido a que la dosis de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ presentó los valores más bajos en rendimiento de elote y en las variables del componente del rendimiento. Por otra parte, no se encontraron diferencias estadísticas significativas en dichas variables entre las dosis de 100 y 80 kg P₂O₅ ha⁻¹ (Rivera *et al.*,

2008), motivo por el cual se usó esta última dosis. Para establecer el efecto de los tratamientos de riego sobre la fenología del híbrido de maíz elotero A-7573,

se estudiaron las cinco etapas vegetativas y seis etapas reproductivas que se muestran en el Cuadro 4.2. Para definir el final en cada etapa de desarrollo se consideró el criterio propuesto por Hanway (1982) el cual consiste en realizar muestreos continuos, y cuando más del 50% de las plantas se encuentran en una misma etapa de desarrollo ésta se da por iniciada. Como las tensiones de humedad en el suelo fueron impuestas a partir de la etapa vegetativa V3, la evaluación se realizó en las siguientes tres etapas: V6, V9 y V12.

Para estimar el tiempo fisiológico (en unidades térmicas, o grados-día de desarrollo) en cada etapa de desarrollo, se consideraron los datos diarios de temperaturas máxima y mínima tomados en la estación meteorológica del poblado de Sihochac, Campeche, ubicada a aproximadamente dos kilómetros del sitio experimental, en las coordenadas 19°30' de latitud norte y 90°35' de longitud oeste, a una altitud de 15 msnm, manejada por la Comisión Nacional del Agua.

Cuadro 4.2. Etapas fenológicas vegetativas (V) y reproductivas (R) de la planta de maíz.

Vegetativas (V)	Reproductivas (R)
0. Siembra (S0)	1. Aparición del jilote (R1 al 50%)
1. Etapa de emergencia (VE)	2. Aparición del estigma (R2 al 50%)
2. Aparición de hoja específica número tres (V3)	3. Aparición de la espiga (R3 al 50%)
3. Aparición de hoja número seis (V6)	4. Grano perlita (R4 al 50%)
4. Aparición de hoja número nueve (V9)	5. Grano cristalino (R5 al 50%)
5. Aparición de hoja número doce (V12)	6. Grano lechoso (R6 al 50%)

Los grados días desarrollo para cada etapa fenológica (GDD) fueron estimados por el método estándar descrito por Harpal and Tupper (2004), con la expresión:

$$GDD = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) - T_{\text{base}} \right] \quad (1)$$

Donde:

T_{\max} = Temperatura máxima diaria (°C)

T_{\min} = Temperatura mínima diaria (°C)

T_{base} = Temperatura umbral mínima para el cultivo (°C)

n = Número de días de la etapa.

La temperatura base (T_{base}) fue calculada mediante el método del mínimo coeficiente de variación de Arnold (1959), el cual consiste en evaluar la expresión 1 usando una temperatura base arbitraria dada (T_{base}), y calcular posteriormente el coeficiente de variación de los valores obtenidos para GDD; el procedimiento se repite con otro valor arbitrario para T_{base} , hasta encontrar la T_{base} que presente el menor valor del coeficiente de variación en los valores de GDD, la cual se designa como la T_{base} final.

Una vez estimados los GDD para cada etapa, se generaron los modelos fenológicos lineales ($Y = a + b \cdot X$) considerando como variable independiente (Y) el número de etapas de desarrollo de siembra a grano lechoso, y como variable independiente (X) la acumulación térmica de cada fase fenológica, de manera similar a los generados en los trabajos de Robertson (1984).

También se generaron ecuaciones lineales para la tasa de desarrollo (Td) para cada etapa fenológica con el siguiente modelo:

$$Td = a + b \cdot T \quad (2)$$

Donde:

Td = tasa de desarrollo en la etapa fenológica.

b = El inverso de los grados días de desarrollo acumulados por etapa (1/GDDE).

T = Temperatura promedio del periodo de duración de la etapa (°C).

a = Producto del coeficiente b por la temperatura base (T_{base}).

4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La temperatura máxima diaria registrada fluctuó entre 32 y 40°C, la mínima entre 20 y 25°C, y la diferencia entre ambas fue en promedio de 5°C (Figura 4.1). La temperatura base (T_{base}) calculada para el maíz híbrido A-7573 fue de 10°C, para todas las etapas de desarrollo en las cuatro tensiones de humedad, que coincide con las reportadas por Cross y Zuber (1972) y Cutforth y Shaykewich (1989) como la temperatura base óptima para el crecimiento y desarrollo del maíz. Asimismo Ruiz *et al.* (1998) han reportado para híbridos formados con progenitores que tienen germoplasma tropical y subtropical temperaturas base de 10 y 8 °C respectivamente.

En el Cuadro 4.3 se muestran los días acumulados transcurridos de la siembra hasta la aparición de cada etapa fenológica, así como los grados días de desarrollo calculados con la expresión 1, para los tratamientos de humedad evaluados. No se observaron diferencias en los días transcurridos ni en los grados días de desarrollo requeridos para la aparición de las etapas fenológicas correspondientes al desarrollo vegetativo y reproductivo entre los tratamientos más húmedos. En éstos la aparición de los síntomas usados para definir el cambio de etapa fue simultánea, por lo que la evaluación de la ecuación 1 arrojó exactamente los mismos resultados. Solo se observó diferencia entre los tratamientos

más secos con respecto de los más húmedos y entre éstos últimos (Cuadro 4.3).

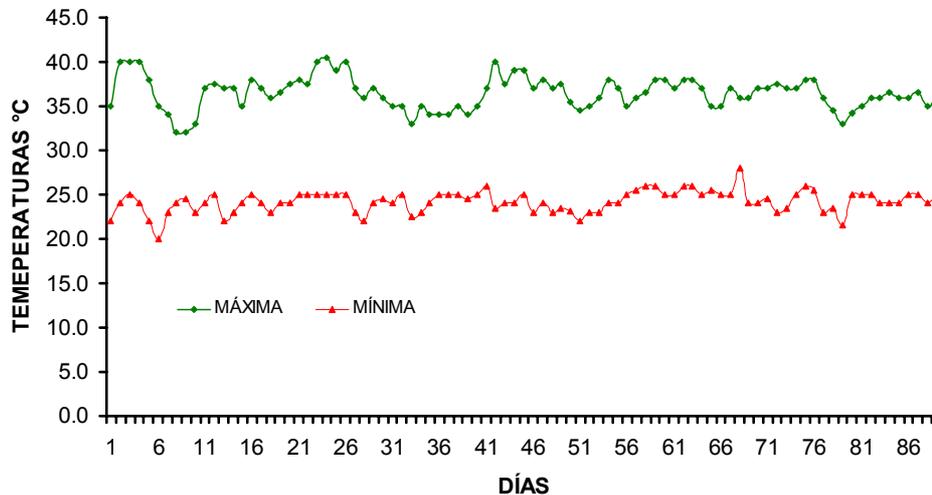


Figura 4.1. Comportamiento de la temperatura máxima y mínima durante el periodo de realización del experimento.

Considerando las etapas fenológicas del crecimiento vegetativo, en la etapa V12 se presentó el mayor número de días de retraso entre los tratamientos de -55 kPa y -80 kPa, con 3 y 6 días (63 y 126 GDD₋₁₀), con respecto de los tratamientos de -5 kPa y -30 kPa respectivamente.

Resultados similares al nuestro fueron reportados por Traore *et al.* (2000) en maíz transgénico híbrido resistente a *Ostrinia nubilalis* (Hübner), y por Smit y Singels (2006) en cultivares de caña de azúcar. El retraso en la aparición de las hojas puede atribuirse a los bajos contenidos de agua en las plantas, los cuales ocasionaron una baja turgencia en las células, afectando la tasa de división y alargamiento, y demorando el desarrollo de las hojas (Abo-El-Kheir y Meek, 2007).

Si se observa el Cuadro 4.3 se nota que en la etapa V9 hay un día de diferencia en la aparición de la misma (20 GDD₋₁₀) entre los tratamientos más húmedos respecto del más

seco, en el que la etapa aparece después; posteriormente en la etapa V12 la diferencia se hace de 6 días (126 GDD₋₁₀) para luego en las etapas R1 y R2 ampliarse a 10 días (198 GDD₋₁₀), y en la etapa R3 a 12 días (244 GDD₋₁₀). La mayor tensión de humedad retrasó la aparición de las etapas V9 a la R3, pero luego en las etapas R4 a la R6 ocurre lo contrario: la diferencia de 12 días se redujo a 9 (123 GDD₋₁₀) y luego a 6 días (123 GDD₋₁₀). Es decir, la tensión de humedad aceleró el desarrollo en estas últimas etapas (bajando de 12 a 6 días de diferencia), lo que sugiere que el estrés hídrico retrasa el desarrollo vegetativo pero acelera el desarrollo reproductivo del híbrido A-7573.

Si se observa el Cuadro 4.3 se nota que en la etapa V9 hay un día de diferencia en la aparición de la misma (20 GDD₋₁₀) entre los tratamientos más húmedos respecto del más seco, en el que la etapa aparece después; posteriormente en la etapa V12 la diferencia se hace de 6 días (126 GDD₋₁₀) para luego en

para luego en las etapas R1 y R2 ampliase a 10 días (198 GDD₋₁₀), GDD₋₁₀), y en la etapa R3 a 12 días (244 GDD₋₁₀). La mayor tensión de humedad retrasó la aparición de las etapas V9 a la R3, pero luego en las etapas R4 a la R6 ocurre lo contrario: la diferencia de 12 días se redujo a 9 (123

GDD₋₁₀) y luego a 6 días (123GDD₋₁₀). Es decir, la tensión de humedad aceleró el desarrollo en estas últimas etapas (bajando de 12 a 6 días de diferencia), lo que sugiere que el estrés hídrico retrasa el desarrollo vegetativo pero acelera el desarrollo reproductivo del híbrido A-7573.

Cuadro 4.3. Efecto de la tensión de humedad en el suelo sobre la duración del tiempo cronológico y fisiológico de las etapas fenológicas del maíz híbrido A-7573 en Campeche.

Etapas fenológicas	Días acumulados			GDD ₋₁₀		
	-5kPa, -30kPa	-55kPa	-80kPa	-5kPa, -30kPa	-55kPa	-80kPa
S0	S=0 _(13 Abril)	S=0 _(13Abril)	S=0 _(13Abril)	0	0	0
VE	S + 7	S + 7	S + 7	135	135	135
V3	S + 13	S + 13	S + 13	247	247	247
V6	S + 21	S + 21	S + 21	424	424	424
V9	S + 30	S + 31	S + 31	612	632	632
V12	S + 37	S + 40	S + 43	781	844	907
R1	S + 43	S + 49	S + 53	873	995	1076
R2	S + 51	S + 57	S + 61	1013	1132	1211
R3	S + 53	S + 61	S + 65	1080	1243	1324
R4	S + 60	S + 66	S + 69	1297	1427	1492
R5	S + 66	S + 71	S + 73	1421	1529	1572
R6	S + 71 _(27 Junio)	S + 75 _(1 julio)	S + 77 _(3 julio)	1463	1545	1586

GDD₋₁₀= Grados días desarrollo base diez; S0=Siembra; VE= Etapa de emergencia; V3= Aparición de hoja específica número tres; V6= Aparición de hoja número seis; V9= Aparición de hoja número nueve; V12= Aparición de hoja numero doce; R1= Aparición del jilote; R2 = Aparición del estigma; R3= Aparición de la espiga; R4= Grano perlita; R5= Grano cristalino; R6= Grano lechoso.

Similarmente, el número de GDD₋₁₀ requeridos para la aparición de las etapas fenológicas varió conforme se incrementó la tensión de humedad en el suelo, siendo necesarios más GDD₋₁₀ para la aparición de las etapas a mayor tensión de humedad, lo que fue registrado a partir de la etapa fenológica vegetativa V9, aunque el efecto fue más notorio en la etapa reproductiva R6. En los tratamientos de tensión de humedad en el suelo al momento del riego de -55 kPa y -80 kPa se observó la necesidad de 82 y 123 GDD₋₁₀ más respectivamente para llegar a grano lechoso que en los tratamientos de -5 kPa y -30 kPa (Cuadro 4.3).

De la etapa fenológica vegetativa V3 hasta la etapa de jilote R1 se observó un retraso de 6

y 10 días equivalente a 122 y 203 GDD₋₁₀ respectivamente en los tratamientos de -55kPa y -80kPa con respecto a los tratamientos de -5 kPa y -30 kPa. Soler *et al.* (2007) Abrecht y Carberry (1993) reportan efectos similares de retraso en la aparición del jilote, y Scout *et al.* (1978) en la aparición de la panoja del sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. La falta de humedad en el suelo retrasó la aparición de las etapas fenológicas correspondientes al desarrollo vegetativo, lo cual indica que el crecimiento del híbrido A-7573 se ve limitado por la disponibilidad de agua en el suelo.

En las etapas fenológicas reproductivas, de la aparición de jilote (R1) a grano lechoso (R6), en los tratamientos correspondientes a

las menores tensiones de humedad el maíz utilizó un mayor número de días para pasar de una etapa a la siguiente con respecto de los tratamientos en los que se aplicaron las mayores tensiones (2 y 5 días más que en los tratamientos de -55kPa y -80kPa respectivamente; Cuadro 4.3), y requirió una mayor cantidad de grados días de desarrollo, con 40 y 80 GDD₋₁₀. Resultados similares han sido reportados por Karam *et al.* (2003) en maíz variedad cv *Manuel*. La aceleración en la aparición de las etapas fenológicas correspondientes al desarrollo reproductivo cuando el cultivo está sometido a un estrés hídrico ha sido reportada por Rosales-Serra *et al.* (2004) como una mecanismo adaptativo de escape de los cultivos al estrés hídrico.

Considerando la mayor parte del ciclo del cultivo, de la etapa vegetativa V3 a grano lechoso (R6), las tensiones de humedad a -55 kPa y -80 kPa retrasaron la cosecha del

elote 4 y 6 días, respectivamente, en relación a la de -30 kPa. Dale y Daniels, (1995) y Payero *et al.* (2006) reportan efectos similares en el retraso de la cosecha por efecto de estrés hídrico. Sin embargo, aunque en este experimento se presentó el mismo patrón de comportamiento de retraso en la madurez, difiere en el tiempo a la cosecha; por ejemplo, Farré y Faci (2006), en maíz y sorgo encontraron un retraso de 12 y 5 días en llegar a la madurez respectivamente. Esta diferencia puede deberse, entre otras cosas, a la intensidad y tiempo del estrés hídrico al que están sujetas las plantas, al genotipo, así como a la forma como fueron cultivadas (Mc Master *et al.*, 2005).

Por otra parte, en el Cuadro 4.4 se incluyen los modelos de desarrollo construidos para cada etapa vegetativa evaluada, de acuerdo a la tensión de humedad en el suelo a la que fue sometido el cultivo.

Cuadro 4.4. Modelos de desarrollo para el maíz híbrido A-7573 con diferentes tensiones de humedad en el suelo en el estado de Campeche.

Etapas fenológica	-5kPa y -30kPa	-55kPa	-80kPa
VE	$Td = -0.074019 + 0.007402 * T$	$Td = -0.074019 + 0.007402 * T$	$Td = -0.074019 + 0.007402 * T$
V3	$Td = -0.040486 + 0.004049 * T$	$Td = -0.040486 + 0.004049 * T$	$Td = -0.040486 + 0.004049 * T$
V6	$Td = -0.023574 + 0.002357 * T$	$Td = -0.023574 + 0.002357 * T$	$Td = -0.023574 + 0.002357 * T$
V9	$Td = -0.016340 + 0.001634 * T$	$Td = -0.015813 + 0.001581 * T$	$Td = -0.015813 + 0.001581 * T$
V12	$Td = -0.012809 + 0.001281 * T$	$Td = -0.011848 + 0.001185 * T$	$Td = -0.011022 + 0.001102 * T$
R1	$Td = -0.011456 + 0.001146 * T$	$Td = -0.010053 + 0.020408 * T$	$Td = -0.009295 + 0.000929 * T$
R2	$Td = -0.009873 + 0.000987 * T$	$Td = -0.008834 + 0.000883 * T$	$Td = -0.008255 + 0.000825 * T$
R3	$Td = -0.009263 + 0.000926 * T$	$Td = -0.008048 + 0.000805 * T$	$Td = -0.007553 + 0.000755 * T$
R4	$Td = -0.007709 + 0.000771 * T$	$Td = -0.007008 + 0.000701 * T$	$Td = -0.006703 + 0.000670 * T$
R5	$Td = -0.007037 + 0.000704 * T$	$Td = -0.006542 + 0.000654 * T$	$Td = -0.006363 + 0.000636 * T$
R6	$Td = -0.006837 + 0.000684 * T$	$Td = -0.006472 + 0.000647 * T$	$Td = -0.006304 + 0.000630 * T$

T = Temperatura media en °C; Td = Tasa de desarrollo; VE= Etapa de emergencia; V3= Aparición de hoja específica número tres; V6= Aparición de hoja número seis; V9= Aparición de hoja número nueve; V12= Aparición de hoja numero doce; R1= Aparición del jilote; R2 = Aparición del estigma; R3= Aparición de la espiga; R4= Grano perlita; R5= Grano cristalino; R6= Grano lechoso.

Como se observa en el Cuadro 4.4 el modelo de desarrollo es diferente en cada etapa fenológica, así como para las diferentes tensiones de humedad en el suelo a las que estuvo sujeta la planta, a excepción de las etapas VE, V3 y V6, que presentan el mismo modelo de desarrollo para todas las tensiones de humedad, debido a que la tensión de humedad en el suelo fue impuesta al cultivo a partir de la etapa V3. La etapa V6 presenta el mismo modelo de desarrollo para las cuatro tensiones de humedad, debido a que todavía no se observaban efectos notorios de los tratamientos de riego, puesto que en esa etapa los tratamientos apenas se habían iniciado. En la etapa V9, se observa que en las tensiones más bajas (suelo más húmedo) se encontraron modelos para la tasa de desarrollo diferente con respecto a los observados a tensiones más altas, pero entre

estas últimas siguen siendo iguales. Obsérvese en el Cuadro 4.4 que a partir de la etapa V12 hasta la R6 todos los modelos de desarrollo son diferentes para cada tensión de humedad, indicativo del claro efecto que tiene el déficit hídrico sobre el crecimiento y desarrollo del maíz elotero A-7573.

Por otra parte, los diferentes tratamientos de tensión de humedad en el suelo al momento del riego originaron diferentes modelos fenológicos de tipo lineal entre el número de etapas de desarrollo y los grados días acumulado base diez (GDD₋₁₀).

La ecuación de regresión lineal fue $Y = 0.0073\text{GDD}_{-10} - 0.1084$ con $R^2 = 0.99$ para -5 kPa y -30 kPa; $Y = 0.0065\text{GDD}_{-10} + 0.0132$ con $R^2 = 0.98$ y $Y = 0.0062\text{GDD}_{-10} + 0.0603$ con $R^2 = 0.97$ para -55 kPa y -80 kPa respectivamente, tal y como se observa en las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4.

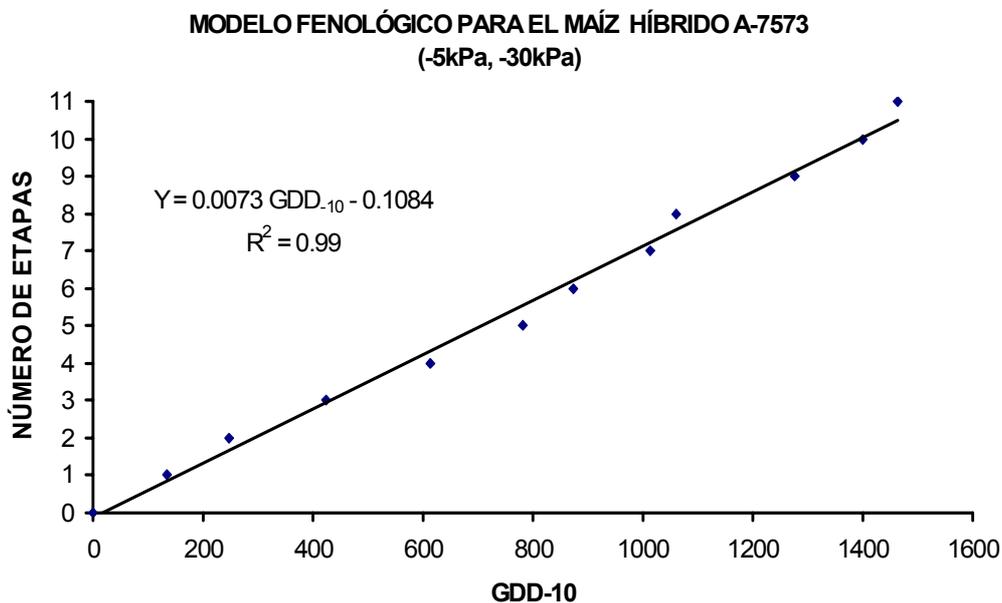


Figura 4.2. Modelo fenológico del Híbrido A-7375 para los tratamientos de tensión de de humedad en el suelo de -5 y -30 kPa

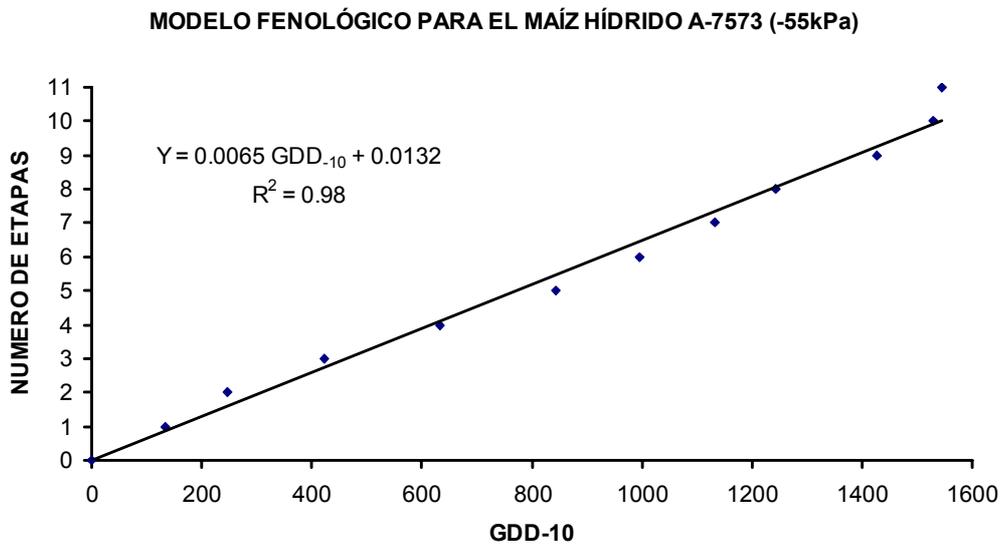


Figura 4.3. Modelo fenológico del Híbrido A-7375 para el tratamiento de tensión de humedad en el suelo de -55 kPa.

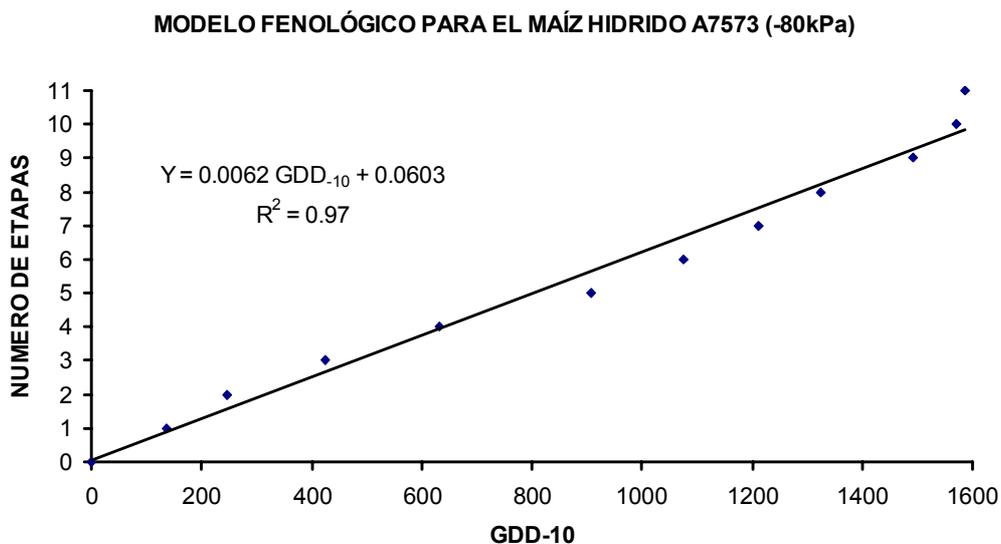


Figura 4.4. Modelo fenológico del Híbrido A-7375 para una tensión de humedad en el suelo de -80 kPa.

Según Máthe-Gáspár y Kovács (2003) el desarrollo de las plantas está altamente correlacionado con el contenido de humedad en suelo. Conforme disminuye ésta, disminuyen las tasas de desarrollo, lo cual provoca un retraso en la cosecha, dando origen a diferentes tasas de desarrollo y

consecuentemente diferentes modelos fenológicos. En los modelos fenológicos obtenidos, se observa el claro efecto que tiene la tensión de humedad sobre el desarrollo del híbrido A-7573, es decir, al incrementar la tensión de humedad en el suelo las plantas requieren un mayor número de GDD-10 para llegar a grano lechoso.

Resultados similares al nuestro han sido reportados por Bennouna *et al.* (2004) al relacionar los GDD con el número de hojas en maíz cv *Raissa* y por Traore *et al.* (2000) en maíz transgénico. El parámetro *b* del modelo fenológico general propuesto por Robertson Figura 1, 2, y 3 para predecir etapas fenológicas en maíz, que representa la tasa de desarrollo del cultivo, varía con la tensión de humedad, por lo que solo puede ser usado para predecir las etapas fenológicas del híbrido A-7573, bajo ciertas condiciones de tensión de humedad.

4.5. CONCLUSIONES

No se observaron diferencias en el tiempo a la aparición de las etapas fenológicas correspondientes al desarrollo vegetativo del maíz (y consecuentemente tampoco en el número de grados días de desarrollo requeridos) entre los tratamientos de tensión de humedad de -5 kPa y -30 kPa.

En los tratamientos de tensión de humedad en el suelo de -55 kPa y -80 kPa se observó un retraso en la aparición en las etapas fenológicas vegetativas: el mayor atraso correspondió a la etapa V12, que apareció con 3 y 6 días de retraso en ambos tratamientos respectivamente, con respecto de los tratamientos húmedos; este retraso se incrementó hasta 12 días en las primeras etapas reproductivas, para luego disminuir en las siguientes etapas reproductivas y concluir con una diferencia de 6 días.

No se observó diferencia en el tiempo a la aparición de las etapas fenológicas correspondientes al desarrollo reproductivo del maíz entre los tratamientos de tensión de humedad de -5 kPa y -30 kPa.

Los tratamientos de tensión de humedad de -55 kPa y -80 kPa aceleraron la aparición de las etapas fenológicas correspondientes al

desarrollo reproductivo, requiriendo un menor número de días para llegar a la cosecha. De siembra a grano lechoso se requirieron 82 y 123 GDD₋₁₀ (4 y 6 días) respectivamente más que en los tratamientos más húmedos.

La tasa de desarrollo del híbrido A-7573 en la etapa vegetativa se retrasa conforme la tensión de humedad en el suelo aumenta de -30kPa a -80kPa y se acelera en las etapas reproductivas.

Se deduce que no existe un solo modelo fenológico para las diferentes tensiones de humedad, ya que los modelos fenológicos propuestos en la literatura científica, asumen cultivos sin estrés hídrico. Cuando se introduce este factor, ese modelo “único” ya no funciona, pues el estrés puede retrasar y/o acelerar las etapas de desarrollo dependiendo de la etapa.

Como se observa en los modelos, considerando todo el ciclo del cultivo las tasas de desarrollo son superiores a -5 y -30kPa (0.0073) que a -50 kPa (0.0065) y -80 kPa (0.0062) respectivamente. Así, a mayor tensión es menor tasa de desarrollo y por ende, se requiere más tiempo para la ocurrencia de las etapas fenológicas.

4.6. LITERATURA CITADA

1. Abo-El-Kheir, M.S.A. and B.B. Mekk. 2007. Response of maize single cross-10 to water deficits during silking and grain filling stages. *World J. Agric.Sci.* 3: 269-272.
2. Abrecht, D.G. and P.S. Carberry. 1993. The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield. *Field Crops Res.* 31: 55-69.
3. Bennouna, B., A. Lahrouni., O. Bethenod., C. Fournier., B. Andrieu and S. Khabba. 2004. Development of maize internodes

- under drought stress. *Agron. J. Asian.* 2: 94-102.
4. Bolaños, J. and G.O. Edmeades. 1993. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical Maize. II. Responses in reproductive behavior. *Field Crops Res.* 31: 253-268.
 5. Cutforth, H.W. and C.F. Shaykewich. 1989. Relationship of development rates of corn from planting to silking to air and soil temperature and to accumulated thermal units in a prairie environment. *Can. J. Plant Sci.* 60: 121-132
 6. Cross, H.Z. and M.S. Zuber. 1972. Prediction of flowering date in maize based on different methods of estimating thermal units. *Agron. J.* 64: 351-355.
 7. Dale, R.F and J.A. Daniels. 1995. A weather-soil variable for estimating soil moisture stress and corn yield probabilities. *Agron. J.* 87: 1115-1121.
 8. Doraiswamy, P.C. and D.R. Thompson. 1982. A crop moisture stress index for large areas and its application in the prediction of spring wheat phenology. *Agric. Meteorol.* 27: 1-15.
 9. Farré, I and J.M. Faci. 2006. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agric. Water Manag.* 83: 135-143.
 10. Hanway, J.J. 1982. How a Corn Plant Develops. Iowa State University. Science and Technology-Cooperative Extension Services-Ames. Service. Ames, Iowa, E.U.A. 21 p.
 11. Harpal, S.M. and G.J. Tupper. 2004. *Agrometeorology: Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture.* Chapter 3. Environmental temperature and crop production. Pp. 43-68. New York. London. Oxford.
 12. Hodges, T. 1991. Temperature and water stress effects on phenology. p.7-13. *In* T. Hodges (ed.) *Predicting Crop Phenology.* CRC. Press, Boca Raton, FL. USA.
 13. Kar, G and H.N. Verma. 2005. Phenology based irrigation scheduling and determination of crop coefficient of winter Maize in rice fallow of eastern India. *Agric. Water Manag.* 75: 169-183.
 14. Karam, F., J. Breidy., Ch. Stephan and J. Rouphael. 2003. Evapotranspiration yield and water use efficiency of drip irrigated corn in the Bekaa Valley of Lebanon. *Agric. Water Manag.* 63: 125-137.
 15. Kiniry, J.R. and R. Bonhomme. 1991. Predicting maize phenology. p.115-131. *In* T. Hodges (ed.) *Predicting Crop Phenology.* CRC. Press, Boca Raton, FL. USA.
 16. Kipkorir, E.C., D. Raes., Massawe. 2002. Seasonal water production functions and yield response factors for maize and onion in Perkerra, Kenya. *Agric. Water Manag* (56)229-240.
 17. Kramer, J.P. 1983. *Water Relations of Plants.* Academic Press, New York. USA. 449 p.
 18. Máthe-Gáspár. G. and G.J. Kovács. 2003. Use of simulation technique to distinguish between the effect of soil and weather on crop development and growth. *Applied Ecology and Environmental Res.* 1: 87-92.
 19. McMaster, G., W. Wilhelm and A. Frank. B. 2005. Developmental sequences for simulating crop phenology for water-limiting conditions. *Aust J. Agric. Res.* 56: 1277-1288.
 20. Norwood, C. A., 1995. Comparison of limited irrigated versus dry land cropping system in the U. S Great Plains. *Agron. J.* (87) 737-743.
 21. Norwood, C. A., R. S, Currie. 1997. Dry land corn versus grain sorghum in Western Kansas. *J. Prod. Agric.* (10) 152-157.

22. Payero, J.O., S. T. Melvin, S. Irmak, and D. Tarkalson. 2006. Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agric. Water Manag.* 84: 101-112.
23. Rivera, H.B., E. Carrillo A., J.J. Obrador O, J.F. Juárez L y L.A. Aceves N. 2008. La Tensión de Humedad en el Suelo y la Fertilización Fosfatada sobre los Componentes del Rendimiento en Maíz Elotero (*Zea Mays L.*) Híbrido A75-73, en Campeche, México. Artículo sometido a la revista *Agricultural Water Management*.
24. Robertson, G.M. 1984. Weather-Based Mathematical Models for Estimating Development and Ripening of Crops. World Meteorological Organization. Technical Note No. 180. Geneva, Switzerland. p. 11-16
25. Rosales-Serra, R., J. Kohashi-Shibata., J.A. Acosta-Gallegos., C. Trejo-Lopez., J. Ortiz-Cereceres and J.D. Nelly. 2004. Biomass distribution, maturity acceleration and yield in drought-stressed common beans cultivars. *Field Crops Res.* 85: 202-211.
26. Ruiz, C., J.J. Sánchez G. and M. M. Goodman. 1998. Base temperature and heat unit requirement of 49 mexican maize race. *Maydica* 43: 277-282.
27. Salinas M., Y., O. Rodríguez. y H.V.A. González. 1993. Relación hídrica en las estructuras reproductivas, asincronía floral y rendimiento de maíz sometido a sequía. *Agrociencia, serie Fitociencia* 4(4): 33-46.
28. Scout, D.G., T. Kannangara and G.M. Simpson. 1978. Drought resistance of *Sorghum bicolor*. 2. Water stress effects on growth. *Can. J. Plant Sci.* 58: 225-233.
29. Soler, C. M. T., G. Hoogenboom., P.C Sentelhas and A. P. Duarte. 2007. Impact of water stress on maize grown off-season in a subtropical environment. *J. Agronomy & Crop Science* (193) 247-261.
30. Smith, D. S., I. T. Ritchie. 1992. Short and long term response of corn to a pre-anthesis soil water deficit. *Agron. J.* (84) 107-113.
31. Smit, M. A., A. Singels. 2006. The response of sugarcane canopy development to water stress. *Field Crops Research* (98) 91-97.
32. Traore, S.B., Carlson, R.E., Pilcher, C.D., Rice, M.E. 2000. Bt and Non-Bt Maize growth and development as affected by temperature and drought stress. *Agron. J.* 92:1027-1035.
33. Wong, R.R., A. Muñoz .O. y L.E. Mendoza O. 1983. Efecto de la sequía sobre características vegetales reproductivas y de eficiencia en variedades de sorgo. *Agrociencia.* 51: 101-114.

CAPÍTULO V

**Conclusiones y recomendaciones generales de la
investigación sobre riego y fertilización fosfatada de maíz
elotero Híbrido A-7573**

Conclusiones y recomendaciones generales de la investigación sobre riego y fertilización fosfatada de maíz elotero híbrido A-7573

5.1. CONCLUSIONES

5.1.1. SOBRE LOS COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

Los diferentes niveles de tensión de humedad al momento del riego afectaron de la misma forma a todas las variables de respuesta estudiadas. El análisis de varianza del experimento mostró que los tratamientos más húmedos (-5 y -30 kPa) fueron estadísticamente iguales, pero diferentes del efecto del de -55 kPa, que a su vez resultó diferente del más seco ($p \leq 0.01$). Los mayores valores promedio en todas las variables se observaron en el tratamiento más húmedo, como resultado de la baja tensión existente entre la matriz del suelo y las moléculas de agua.

En todas las variables de respuesta evaluadas los efectos de las dosis de fertilización fosfatada de 80 y 100 Kg ha⁻¹ resultaron estadísticamente iguales, diferentes del efecto de la dosis más baja en todos los casos ($p \leq 0.01$), con la única excepción de la variable rendimiento de elote fresco, donde todas fueron estadísticamente iguales. Las aplicaciones de 80 Kg P₂O₅ ha⁻¹ son suficientes para que los caracteres agronómicos del híbrido A-7573 expresen su potencial genético.

El estrés por falta de agua y el ocasionado por la deficiencia de fósforo afectaron mayormente a las variables relacionadas con la formación de biomasa y peso de elote: PST, PSP, PFE, PSE, REF y RES y en menor proporción, a las relacionadas con el crecimiento de la planta y el elote: AP, DT, LH y DE.

No se observó interacción entre tratamientos de riego y de fertilización.

Las regresiones múltiples usadas para relacionar los valores medidos en las variables de respuesta con los factores en estudio mediante un modelo cuadrático, indicaron que la dosis óptima de fósforo siempre estuvo cerca o por encima del nivel más alto en estudio, de 100 Kg ha⁻¹. En contraste, el valor máximo de casi todas las variables en los modelos siempre se encontró a una tensión de humedad cero. Las únicas excepciones fueron las variables REF y RES, para las que los modelos cuadráticos predicen un valor máximo fisiológico a tensiones de humedad al momento del riego de -8.05 kPa y -9.08 kPa respectivamente.

5.1.2. SOBRE LA CALIDAD

Las variables de respuesta para evaluar la calidad del elote mostraron efectos altamente significativos ($p \leq 0.0001$) a las diferentes tensiones de humedad en el suelo al momento del riego, así como a los niveles de fertilización fosfatada, con excepción del número de hileras por elote, donde el efecto fue significativo al 4.42%.

El índice de cosecha no mostró diferencias estadísticas entre tratamientos ni de riego ni de fertilización, lo que sugiere que la formación de grano en el cultivo está íntimamente relacionada con la formación de biomasa.

En todas las variables con diferencias estadísticas significativas, los efectos de los tratamientos más húmedos (-5 y -30 kPa) y con mayor dosis de fertilización fosfatada (80 y 100 Kg ha⁻¹) fueron estadísticamente iguales, diferentes significativamente del resto de los tratamientos. En estos últimos se observó un menor llenado de grano.

El estrés hídrico y la deficiencia de fósforo afectaron de menor manera el número de hileras y el diámetro de elote y, en forma más pronunciada, el llenado de grano y el rendimiento de elote fresco y seco.

El fósforo tuvo un efecto significativo en la formación de biomasa, ya que su deficiencia afectó notablemente a las variables: peso seco de grano, de elote sin brácteas y rendimiento de elote seco.

Los valores de las variables que caracterizan la calidad del elote: longitud, peso fresco y número de granos por elote, fueron alrededor de 40% más altos en el tratamiento de menor tensión de humedad con respecto al de -80 kPa, y 11% más altos con la dosis de 80 Kg ha⁻¹ de fósforo con relación a la de 60 Kg ha⁻¹.

De los modelos de regresión cuadráticos obtenidos, se determinaron dosis de fertilización de 87.1 a 99.0 Kg ha⁻¹ de fósforo, las cuales minimizan el número de granos sin llenar y maximizan los valores del resto de variables de respuesta evaluadas.

La mayor eficiencia en el uso del agua de riego se encontró en el tratamiento de tensión de humedad de -30 kPa. Dado que los valores encontrados en este tratamiento, en todas las variables de respuesta evaluadas, fueron muy similares y estadísticamente iguales a los observados en el tratamiento de -5 kPa.

5.1.3. SOBRE LA FENOLOGÍA

No se observaron diferencias temporales en la aparición de las etapas fenológicas de desarrollo vegetativo y reproductivo del maíz (y consecuentemente tampoco en el número de grados días de desarrollo) entre los tratamientos de tensión de humedad de -5 kPa y -30 kPa. No obstante, los tratamientos de -55 kPa y -80 kPa retrasaron la aparición de las etapas vegetativas, la etapa V12 tuvo 3 y 6 días de retraso, respectivamente, en relación a los tratamientos húmedos; este retraso se incrementó hasta 12 días en las primeras etapas reproductivas, disminuyendo en las subsecuentes para concluir con una diferencia de 6 días.

Los tratamientos de tensión de humedad de -55 kPa y -80 kPa aceleraron la aparición de las etapas fenológicas correspondientes al desarrollo reproductivo, requiriendo un menor número de días para llegar a la cosecha. De siembra a grano lechoso requirieron 82 y 123 GDD₁₀ (4 y 6 días) más que los tratamientos más húmedos, respectivamente.

La tasa de desarrollo del híbrido A-7573 en la etapa vegetativa se retrasa conforme la tensión de humedad en el suelo aumenta de -30kPa a -80kPa y se acelera en las etapas reproductivas.

Se deduce que no existe un solo modelo fenológico para las diferentes tensiones de humedad, ya que los propuestos en la literatura científica, asumen cultivos sin estrés hídrico. Cuando se introduce este factor, ese modelo “único” ya no funciona, pues el estrés puede retrasar y/o acelerar el desarrollo, dependiendo de la etapa.

5.2. RECOMENDACIONES GENERALES

Estudiar, con más detalle, durante varios ciclos y en diferentes suelos, el efecto que tensiones de humedad cercanas a la saturación y dosis de fertilización mayores que las estudiadas a fin de obtener resultados más precisos que permitan definir la tensión y la dosis de fertilización óptimas fisiológicas para el cultivo, con base en modelos de regresión, o bien estimar esta última mediante el modelo conceptual simplificado.

El rendimiento de elote fresco obtenido con -30 kPa y 80 Kg ha⁻¹ de fertilización fosfatada supera en un 16% al promedio nacional y es tres veces superior al rendimiento promedio estatal, por lo que se recomienda su uso en suelos Vertisoles calcicos.

Realizar investigaciones similares usando fertilizantes fosfatados de liberación lenta con la finalidad de observar su eficiencia.

Realizar evaluaciones económicas que validen el uso del riego y las dosis de fertilización aplicadas en el ciclo marceño (Invierno-Primavera).

Para poder definir con mayor precisión la tensión de humedad óptima fisiológica en las variables se sugiere estudiar con mayor detalle el efecto de tensiones de humedad cercanas a la saturación, considerar posiblemente otros modelos con mejor ajuste a los datos, así como tomar en cuenta el costo del riego para definir el óptimo económico.

Estudiar el comportamiento fenológico de diferentes materiales genéticos de maíz elotero con manejo de riego y fertilización fosfatada.

Irrigar al cultivo de maíz elotero cuando la tensión de humedad a 30 cm de profundidad aumente a -30 kPa, dado que los valores de las variables de respuesta evaluadas en esta tensión fueron estadísticamente iguales a los del tratamiento más húmedo ($p \leq 0.01$). Lo anterior implica la aplicación de una lámina de riego en el cultivo de alrededor de 400 mm en el sur de Campeche, en 10 riegos iniciales de aproximadamente 12 mm cada uno desde la siembra hasta que las plantas tengan 30 cm de altura, tres veces por semana, más 11 riegos posteriores de aproximadamente 25 mm cada uno, con un intervalo de aplicación promedio de cinco días. En otras localidades con condiciones meteorológicas diferentes la lámina de riego podrá ser diferente debido a los consecuentes cambios en la demanda evapotranspirativa.

Aplicar una dosis de fertilización de 80 Kg ha⁻¹ de fósforo al cultivo de maíz elotero en el sur de Campeche.

De acuerdo con las ecuaciones de regresión obtenidas, para la tensión de humedad y la dosis de fertilización recomendadas, la longitud y el peso fresco promedio esperado de los elotes es de 29.5 cm y 290 g respectivamente, y se esperaría obtener 16.04 t ha⁻¹ de elotes. La eficiencia en el uso del agua de riego sería de aproximadamente 40 Kg de elotes por hectárea por cada milímetro de lámina de riego aplicada. Dada la naturaleza cársica de los suelos en estudio se recomienda el riego por goteo, siempre y cuando la producción sea para venta en elote.

Dadas las cantidades de agua utilizadas y su naturaleza salobre, se recomienda tener en cuenta el suministro de sodio que, a través de esta tecnología de riego se aplica.

Por último, es recomendable la realización de estudios sobre la dinámica de fósforo, con el fin de conocer con certeza la eficiencia de la fertilización fosfatada.