



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS VERACRUZ

POSTGRADO EN AGROECOSISTEMAS TROPICALES

EFICIENCIA EN EL USO DE NITRÓGENO EN MAÍZ

LUIS CARLOS ALVARADO GÓMEZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

TEPETATES, MANLIO F. ALTAMIRANO, VERACRUZ

2010

La presente tesis, titulada: **Eficiencia en el uso de nitrógeno en maíz**, realizada por el alumno: **Luis Carlos Alvarado Gómez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

AGROECOSISTEMAS TROPICALES

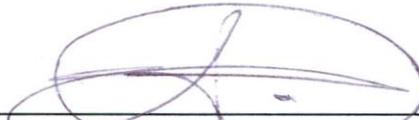
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. CATALINO JORGE LÓPEZ COLLADO

ASESOR:



DR. ARTURO PÉREZ VÁZQUEZ

ASESOR:



DR. CARLOS ALBERTO TINOCO ALFARO

ASESOR:



DR. OTTO RAÚL LEYVA OVALLE

ASESOR:



DR. ALEJANDRO ALONSO LÓPEZ

Tepetates, Manlio F. Altamirano, Veracruz, 5 de noviembre de 2010

EFICIENCIA EN EL USO DE NITRÓGENO EN MAÍZ

Luis Carlos Alvarado Gómez, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2010

El maíz ocupa a nivel mundial el tercer lugar en importancia después del trigo y el arroz. Este cultivo en México cubre una superficie anual aproximada de ocho millones de ha. El N como fertilizante es un elemento importante para lograr rendimientos satisfactorios, sin embargo, el uso indiscriminado de N ha traído cambios negativos en el ambiente, principalmente en la atmósfera, mantos acuíferos y sistemas lagunares, entre otros componentes de los ecosistemas, adicionalmente el alto costo energético hace necesario incrementar la eficiencia en el uso del N (EUN), una de las alternativas es el uso de variedades que absorban y metabolicen el N de manera más eficiente, El desarrollo de variedades mejoradas de maíces será mayor con el conocimiento de las bases fisiológicas y genéticas de la EUN. Con el objetivo de entender los procesos de absorción y EUN en maíz, se establecieron tres experimentos, dos con siembra en macetas y uno establecido en campo. Se evaluaron la absorción y la EUN bajo diferentes condiciones de manejo y con diferentes genotipos, el establecimiento en campo de estos genotipos, para determinar el rendimiento en grano. Se encontró que la absorción de N básicamente está en función de condiciones ambientales y contenido de N en el suelo. La EUN fue 25 % más alta en suelos con bajo contenido de N, estableciéndose como un mecanismo adaptativo al bajo contenido de N, el híbrido (DK-234) y la variedad criolla (Olotillo) utilizados no mostraron diferencia en la EUN, pero si en rendimiento en grano con 6.7 y 4.4 t ha⁻¹. La interacción genotipo x localidades resultó significativa ($p < 0.05$) para las variables, altura de planta y largo de hoja de la mazorca; y para la interacción genotipo x dosis de fertilización resultó significativa ($p < 0.05$) para la variable largo de hoja de la mazorca.

Palabras clave: *Zea mays*, dosis de fertilización, genotipos, interacciones, localidades.

EFFICIENCY IN THE USE OF NITROGEN IN CORN

Luis Carlos Alvarado Gómez, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2010

The corn is the third in importance worldwide after wheat and rice. In Mexico, the corn covers eight million ha. The N fertilizer is an important element to achieve satisfactory yields. However, indiscriminate use of N has brought negative changes in the environment, mainly into air, groundwater and lagoon systems, among other components of ecosystems; in addition the high cost of energy is necessary to increase the efficiency of N (NUE). One alternative is the use of varieties that absorb and metabolize the N more efficiently; the development of improved corn varieties will be higher with the knowledge of physiological and genetic bases of the EUN. In order to understand the processes of uptake and NUE in corn were carry out three experiments, two with planting in pots and one established in the field. The N-uptake and NUE were evaluated under different management conditions and in different genotypes. The field experiment of these genotypes was to determine the grain yield. It was found that N uptake depend of environmental conditions and content of N in the soil. The NUE was 25 % higher in soils with low N. due to an adaptive mechanism to low-N, the hybrid (DK-234) and criolle variety (Olotillo) showed no difference ($p \leq 0.05$) in NUE, but in grain yield, 6.7 and 4.4 t ha⁻¹. Genotype x location interaction was significant ($p < 0.05$) for the variables plant height and ear leaf length and the interaction genotype x dose of fertilizer was significant ($p \leq 0.05$) for the variable length of leaf the cob.

Key words: *Zea mays*, fertilizer dosage, genotypes, interactions, locations.

DEDICATORIA

A mis padres

Pablo Alvarado Torres (†) y María del Socorro Gómez de Alvarado (†) con inmenso cariño y agradecimiento por todos sus sacrificios.

A mi esposa

Micaela Rodríguez de Alvarado, en la salud, en la enfermedad, en la incertidumbre y en los momentos más difíciles de mi vida, siempre has estado a mi lado, solo bastaba voltear y ver que estabas ahí, hemos compartido momentos inolvidables, toda una vida juntos, gracias por ayudarme a seguir mis ideales.

A mis hijas

Odet Lorena y Ana Patricia; nacieron, les canté una canción, caminamos juntos, les compré un helado, unos zapatos, les di un abrazo, ahora una es una brillante universitaria y la otra presidenta de la mesa directiva de su secundaria; lo que yo nunca logré, me han superado, heredaron la inteligencia de sus abuelos y estoy muy orgulloso de ustedes. No cabe duda que el tiempo ha pasado y ahora nos vemos en alguna parte de la ciudad y nos tomamos un café. Quiero ofrecerles esta tesis a cambio de todo el tiempo que les robé y que no estuve con ustedes.

A mis hermanos

Sergio Pablo, Alejandra Mireya, Francisco Javier, Georgina Rocío, Omar Guadalupe y Odeth Lorena que siempre han estado conmigo aún en la distancia.

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Luz infinita, verdad y amor, por encima de toda forma y más allá de toda ciencia.

A la Universidad Veracruzana

Una institución de gran prestigio a la cual le estaré eternamente agradecido por apoyarme en mis deseos de superación profesional y por el privilegio de ser parte de ella.

A la Dirección del Área Biológico-Agropecuarias

Al director Dr. Domingo Canales y al Lic. Enrique Martínez Martínez que siempre me apoyaron.

A la Dirección General de Desarrollo Académico

A la directora la M.C. Leticia Rodríguez Audirac y especialmente a la Lic. Olga Sobrino Ortiz y la Lic. Patricia Luna González en quienes siempre encontré apoyo, orientación y atenciones.

A La Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria

Mi facultad bajo la Dirección del M.C. José Antonio Fernández Figueroa y del M.C. Alejandro Retureta Aponte quienes me apoyaron en todo momento.

A mis alumnos

De quienes aprendí mucho más de lo que yo esperaba. Un reconocimiento especial para el candidato a Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros y la candidata a Dra. Dinora Vázquez, con especial cariño para la M.C. Celina Tirado Piña y con gran afecto para el M.C. Carlos Ruiz Guevara, todos ellos excelentes alumnos. Asimismo a mis tesisistas que confiaron en mí, Martha, Abigail, Ma. del Carmen, Alondra, Carmen, Ana Bertha, Diana Irene, Shirley, Marité, Teresita de Jesús, Eysis Ivonne, Jessica Vianet, Adriana Verenice, Abigail, Epifania, Rubicelia, Norma Celia, Luz Elena, Adriana, Quetzalli,

Leticia, Pedro de Jesús, José Fernando, Victor Hugo, Miguel Angel, René, Javier, Paul, Ramón, Sergio, Aristeo, Lizzette, Tania Mariana y Adriana.

Al CONACyT

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado durante mis estudios.

A mis profesores de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León

Quienes hicieron de mí un profesional preparado y comprometido, especialmente a mis maestros Dr. Emilio Olivares Sáenz, Dr. Francisco Zavala, Dr. Rigoberto Vázquez Alvarado y Dr. Ciro Gregorio Valdés Lozano, que siempre fueron ejemplo a seguir y a quienes debo mis conocimientos de Diseños Experimentales, Genética y Fisiología de los Cultivos.

Al Director Dr. Ponciano Pérez Hernández y la Subdirectora de Educación Dra. Alejandra Soto Estrada

Directivos del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, todo mi agradecimiento por sus atenciones y ayuda en los trámites administrativos así como en lo personal.

A los profesores del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz

Con respeto y admiración por sus enseñanzas Dra. Martha Elena Nava Tablada, Dr. Diego E. Platas Rosado, Dr. Juan Pablo Martínez Dávila, Dr. José López Collado, Dr. Felipe Gallardo López y de manera muy especial a mis amigos la Dra. Pernilla Fajersson, Dr. Eusebio Ortega Jiménez, Dr. Eliseo García Pérez y Dr. Cesáreo Landeros Sánchez.

A la Lic. Gloria Peraza Rejón

Mi maestra de inglés, sin sus cursos no hubiera sido posible superar el examen, le agradezco también sus enseñanzas de Pedagogía, Psicología y sobre todo la gran paciencia que me tuvo.

A mi Consejero Dr. Jorge López Collado

Por su valiosa dirección en el diseño, conducción y realización de esta investigación, asimismo por su visión, tolerancia, paciencia, consejos, motivación y sobre todo gracias por su amistad.

A mi asesor Dr. Arturo Pérez Vázquez

Profesor e investigador incansable, le agradezco la dedicación, tiempo, amabilidad y disposición en la revisión de este documento y en cada plática con usted me llevo enseñanzas y su amistad.

A mi asesor Dr. Carlos Alberto Tinoco Alfaro

Compañero de estudios, en INIFAP, en la UV, considerado el número uno y sobre todo mi amigo, te agradezco tus consejos, en lo personal y en lo académico y tu invaluable ayuda para el logro de esta meta en mi vida.

A mi asesor Dr. Otto Raúl Leyva Ovalle

Le agradezco su ayuda que en todo momento me brindó para la revisión de este trabajo, sus acertados comentarios fueron muy importantes para la consolidación de este documento.

A mi asesor Dr. Alejandro Alonso López

Profesor, estoy en deuda con usted, en su excelente curso de Fisiología Vegetal entendí conceptos y aprendí mucho más de lo que yo esperaba, asimismo gracias por su apoyo durante toda mi formación en este postgrado y sus consejos para mejorar mi investigación en las reuniones que tuvimos.

Al personal administrativo, secretarial, bibliotecario y de campo del Colegio de Postgraduados

Rosario, Fabiola, Laura, Norma, María de los Ángeles, señora Sofía, Marisela, Manuel y Andrés gracias por sus atenciones.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería en Sistemas de Producción Agropecuaria

M.C. José Antonio Fernández Figueroa, M.C. Alejandro Retureta Aponte, Cont. Mayda Liv Rendón Sánchez, Isis del Carmen Carmona Morales, Laura Elidia Cortés Benavides, Lic. Pablo Tadeo Cruz, M.E. Marina Martínez Martínez, M.C. Ana Rosa Rivera Chávez, Dra. Nereida Rodríguez Orosco, Dr. Carlos Alberto Tinoco Alfaro, Dr. Eduardo Graillet Juárez, Ing. Ignacio Pavón Ortiz (†), MVZ Arcadio Valdiviezo Marín, MVZ José Francisco González Aynes, Lic. Dora Lilia Huesca, Ing. Eduwiges González Rodríguez, Biol. Gisela Velásquez Silvestre, Lic. Karla Jazmín Ruiz Santos, MVZ Rubén Ortiz Estévez e Ing. Minerva Leticia Porras Aguirre, gracias por su amistad.

A mis amigos de la Universidad Veracruzana

M.C. Laura E. Domínguez Domínguez (†), Dr. Jorge Morales Mávil, Lic. Patricia Vidaña, Dra. María Alva Angel Lara y Dr. Romeo Ruiz Bello, gracias por sus consejos en lo académico y en lo personal y sobre todo por su amistad.

A mis grandes amigos del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz

Fueron casi cinco años que estuve atrapado en este proyecto, lejos de mi casa y de mi familia, afortunadamente aquí encontré grandes amigos y como olvidarlos Dra. Marilú, Dra. Yalid, M.C. Martín, M.C. Wendy, Ing. Emmanuel, M.C. Vicky y M.C. Ángel, me llevo recuerdos de grandes momentos.

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. Planteamiento del problema.....	2
2. Objetivos.....	2
3. Hipótesis.....	3
4. Revisión de literatura.....	3
5. Literatura citada.....	10
CAPÍTULO I. ABSORCIÓN, CONTENIDO Y EFICIENCIA DE USO DE MACRONUTRIMENTOS EN MAÍZ	14
1.1 Introducción.....	16
1.2 Materiales y métodos.....	18
1.3 Resultados y discusión.....	21
1.4 Conclusiones.....	24
1.5 Literatura citada.....	24
CAPITULO II. PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA, ABSORCIÓN DE NUTRIENTES Y EFICIENCIA DEL USO DEL NITRÓGENO	26
2.1 Introducción.....	29
2.2 Materiales y métodos.....	31
2.3 Resultados y discusión.....	35
2.4 Conclusiones.....	39
2.5 Literatura citada.....	40
CAPÍTULO III. EFECTOS PRINCIPALES E INTERACCIONES ENTRE GENOTIPOS DE MAÍZ, DOSIS DE FERTILIZACIÓN Y LOCALIDADES	42
3.1 Introducción.....	45
3.2 Materiales y métodos.....	47
3.3 Resultados y discusión.....	51
3.4 Conclusiones.....	59
3.5 Literatura citada.....	59
CONCLUSIONES GENERALES	61

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Características fisicoquímicas de los suelos en estudio.....	19
Cuadro 2. Matriz de correlación para la absorción de elementos en gramos por planta del experimento, Absorción de Macronutrientes en maíz.....	22
Cuadro 3. Matriz de correlación para el contenido en (%) de elementos del experimento, Absorción de Macronutrientes en maíz.....	23
Cuadro 4. Matriz de correlación para la eficiencia en el uso de elementos de experimento, Absorción de Macronutrientes en maíz.....	24
Cuadro 5. Factores y niveles en estudio.....	31
Cuadro 6. Características físicas y químicas de los suelos en estudio.....	32
Cuadro 7. Análisis de varianza, fuente de variación (FV) grados de libertad (GL) y cuadrados medios (CM) para las variables peso seco de hojas y tallo (PSHyT) y peso seco de raíces. (PSR).....	35
Cuadro 8. Comparación de medias para las variables peso seco de hojas y tallo y peso seco de raíces.....	36
Cuadro 9. Análisis de varianza, fuente de variación (FV), grados de libertad (GL) y cuadrados medios (CM) para las variables: absorción de N (%), absorción de N (gramos) y eficiencia en el uso de nitrógeno (EUN).....	37
Cuadro 10. Comparación de medias para las variables: absorción de N en porcentaje absorción de N en gramos y eficiencia en el uso de nitrógeno (EUN).....	38
Cuadro 11. Características físicas y químicas de los suelos en las dos localidades.....	48
Cuadro 12. Factores y niveles bajo estudio.....	49

Cuadro 13.	Comparación de medias para las variables altura de planta y diámetro de tallo.....	52
Cuadro 14.	Comparación de medias para las variables largo y ancho de la hoja de la mazorca.....	54
Cuadro 15.	Comparación de medias para las variables peso seco de planta, rendimiento en grano e índice de cosecha.....	57

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Comparación de medias para la interacción de los factores tipo de suelo por nitrógeno, para la variable eficiencia en el uso de nitrógeno (g de MS g de N absorbido ⁻¹).....	39
Figura 2. Comparación de medias para la variable, altura de planta, en la interacción de genotipos por localidades (LCD = 28.4).....	53
Figura 3. Comparación de medias para la variable, largo de hoja de la mazorca, en la interacción de genotipos por dosis de fertilización (LCD = 4.21).....	55
Figura 4. Comparación de medias para la variable, largo de hoja de la mazorca, en la interacción de genotipos por localidades (LCD = 8.2).....	55
Figura 5. Comparación de medias para la variable, largo de hoja de la mazorca, en la interacción de localidades por dosis de fertilización (LCD = 5.6).....	56

INTRODUCCIÓN GENERAL

El maíz ocupa a nivel mundial el tercer lugar en importancia después del trigo y el arroz. El cultivo del maíz en México cubre una superficie anual aproximada de ocho millones de ha de las cuales el 94 % corresponde al ciclo Primavera-Verano (PV) y 6 % al ciclo de Otoño-Invierno (OI). El Nitrógeno (N) es el más importante de los nutrimentos esenciales para esta gramínea debido a las elevadas cantidades en que es demandado durante el crecimiento de este cultivo, adicionalmente es habitualmente deficitario en los suelos agrícolas.

El aumento de la población humana hará que la demanda mundial en la producción de granos sea más del doble, y estará asociado con un aumento de tres veces el uso de fertilizantes nitrogenados, si las prácticas agrícolas y las variedades no cambian.

El uso indiscriminado del N ha traído cambios negativos en el ambiente, principalmente en la atmósfera, mantos acuíferos y sistemas lagunares, entre otros componentes de los ecosistemas, adicionalmente el costo económico y ecológico del N hace necesario que los agricultores deben optimizar el uso del N como fertilizante.

Uno de los problemas de la nutrición mineral es la eficiencia con la cual las plantas pueden usar los elementos, en un escenario de incremento constante en el costo de los fertilizantes. El uso eficiente de los fertilizantes aplicados constituye uno de los factores para mantener la producción de alimentos a un nivel satisfactorio para cumplir con los requerimientos de la población y disminuir los costos de producción, incrementando la rentabilidad agrícola.

La eficiencia en el uso del N (EUN) puede lograrse mediante el uso de técnicas de manejo y también con el uso de genotipos que absorban y metabolicen el N de una manera más eficiente. Para desarrollar variedades mejoradas en la EUN es necesario disponer de variabilidad genética, conocer la EUN y las relaciones de estos parámetros

y las características agronómicas tales como el rendimiento. Además, el estudio de tales relaciones en diferentes niveles de fertilización, puede ayudar a comprender mejor cómo funciona la planta.

El desarrollo de variedades mejoradas de maíz será mayor con el conocimiento de las bases fisiológicas y genéticas de la EUN. La utilización de variedades mejoradas de maíz que poseen elevadas tasas de absorción, asimilación y/o redistribución del Nitrógeno desde las estructuras vegetativas hacia las reproductivas puede ser un elemento tecnológico fundamental en los sistemas agroproductivos.

La EUN depende del tipo de agroecosistema, cultivo, genotipo, fertilizante aplicado, así como de las prácticas de manejo. Cualquier esfuerzo que se realice para conservar el N adicionado y tener la mayor tasa de absorción por las raíces, contribuye a aumentar la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado y se traduce en ahorro para productores y un menor daño al ambiente.

1. Planteamiento del problema

¿Existe una respuesta genética y fisiológica a la eficiencia en el uso de N en el cultivo del maíz?

2. Objetivos

Objetivo general

Determinar la eficiencia en el uso de N del maíz en función de genotipos, prácticas de manejo, dosis de fertilización, localidades y su relación con otros macronutrientes.

Objetivos particulares:

- a) Analizar la cantidad y la concentración de N asociado a los nutrientes: P, K, Ca y Mg en maíz y sus interacciones, con el propósito de entender los procesos involucrados en la eficiencia de la fertilización.
- b) Determinar si las condiciones de manejo influyen en la producción de materia seca, absorción de N y la eficiencia en el uso de N en maíz.

c) Contrastar un genotipo criollo y un híbrido, en cuanto a absorción de N, eficiencia en el uso del N y rendimiento de grano.

d) Evaluar siete genotipos de maíz (seis híbridos y una variedad criolla), bajo dos dosis de fertilización, en dos localidades diferentes con el objetivo de determinar la adaptación de los genotipos a dosis de fertilización y localidades específicas.

3. Hipótesis

El uso de diferentes genotipos, condiciones de manejo, dosis de fertilización y localidades, producen cambios en la eficiencia en el uso de N en maíz.

4. Revisión de literatura

4.1 Importancia del maíz

La agricultura debe satisfacer las demandas de alimentos y materias primas de una población en aumento, minimizando al mismo tiempo los riesgos de contaminación del ambiente. Se deben fomentar los sistemas de producción sustentables para preservar los recursos naturales (Zagal, 2003).

Actualmente en el mundo, alrededor de 100 millones de hectáreas, son sembradas con maíz y el cultivo de este cereal, en los países en desarrollo, representa aproximadamente el 50 % del área total sembrada. En estas regiones el cultivo es usualmente hecho bajo condiciones de baja disponibilidad de N, como resultado de una natural baja fertilidad del suelo (Monneveux *et al.*, 2005).

Los actuales niveles de producción de maíz, no serán suficientes para soportar la demanda de este cereal en las próximas décadas, con serios riesgos para la seguridad alimentaria, debido al uso extensivo de este alimento. En los próximos 40 años, el aumento de la población humana hará que la demanda mundial en la producción de granos sea más del doble, y estará asociada con un aumento de tres veces el uso de fertilizantes nitrogenados, si las prácticas agrícolas y las variedades no cambian (Bänzinger *et al.*, 2002).

En México el maíz es uno de los cultivos de mayor importancia en la agricultura, la economía nacional y desde el punto de vista social, ya que en este cereal se basa un alto porcentaje la alimentación de sus habitantes. Por lo que poco más de 7.5 millones de hectáreas (40% de la superficie agrícola) son sembradas año con año (Turrent-Fernández *et al.*, 2005).

En la región Golfo-Centro, a la que pertenecen los estados de Veracruz y Tabasco, en el año 1996 se cosecharon alrededor de 748 mil hectáreas, por lo que se considera a ésta región entre las principales áreas productoras de maíz de México con una media de rendimiento de 1.65 t ha⁻¹ (Betanzos *et al.*, 1996).

La necesidad de satisfacer la demanda de productos alimenticios básicos de una creciente población tanto estatal como nacional y el incremento constante de los insumos agrícolas que ocasionan que el costo de producción del cultivo de maíz sea muy alto, justifican los programas de investigación y mejoramiento en maíz tendientes a incrementar su producción por unidad de superficie y hacer más rentable el cultivo para que los productores de maíz.

4.2 El uso del nitrógeno en el maíz

De 1960 a 1990, el uso de fertilizantes nitrogenados en los sistemas modernos de agricultura, se ha incrementado en Asia, Norteamérica y el oeste de Europa, (FAO, 2000). Esto acompañado de un acelerado crecimiento en el rendimiento promedio de grano de maíz, durante este mismo período.

El rendimiento de los cereales está directamente relacionado con el uso del N este nutrimento es el que con mayor frecuencia limita la productividad del maíz, aunque teóricamente puede solucionarse con la adición de fertilizantes nitrogenados. Sin embargo es un insumo costoso y muchas veces utilizado ineficientemente. Datos del 2004, muestran que más de cinco millones de toneladas de N, son requeridas para el cultivo del maíz en los Estados Unidos, cada año. Esto equivale a una inversión de 15.9 millones de dólares por año (O'Neill *et al.*, 2004).

4.3 Problemática en el uso del nitrógeno

Hernández *et al.* (2003) establecen que la agricultura moderna, basada en los fertilizantes químicos presenta problemas asociados al riesgo de contaminación de mantos acuíferos, así como un alto consumo de energía para la fabricación de estos insumos.

Uno de los problemas actuales de la nutrición por elementos minerales es la eficiencia con la cual las plantas pueden usar los elementos. Es importante que los elementos incorporados al suelo sean usados con eficiencia, tanto por su elevado costo económico como por los impactos ambientales que estos pueden provocar. De este modo, el uso eficiente de los fertilizantes constituye uno de los factores para mantener la productividad y sostenibilidad de los agroecosistemas (Peña-Cabriaes *et al.*, 2001).

Cruz-Flores *et al.* (2002) mencionan que el N es un elemento indispensable para la fotosíntesis. Es decir, para que las plantas fijen el carbono del aire, acumulen materia seca y produzcan rendimientos se requiere de cantidades suficientes de este elemento. Sin embargo, el N es un nutrimento usualmente deficiente para la agricultura. La eficiencia de uso depende del tipo de agroecosistema, cultivo y fertilizante aplicado, así como de las prácticas de manejo. Cualquier esfuerzo que se realice para conservar el N adicionado y tener la mayor tasa de absorción por las raíces, contribuye a aumentar la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado y se traduce en ahorro para productores y un menor daño al medio ambiente (Gallais y Hirel, 2004).

Sin embargo, el uso indiscriminado de N ha traído cambios negativos en el ambiente, principalmente en la atmósfera, mantos acuíferos y sistemas lagunares, entre otros componentes de los ecosistemas (Socolow, 1999). Es por eso que la Comunidad Económica Europea ha desarrollado una directiva específica (91/676/CEE) para prevenir la contaminación por nitratos (NO_3) de las aguas subterráneas mediante la restricción del uso en exceso de fertilizantes nitrogenados (Prestler *et al.*, 2003).

Adicionalmente, debido a la política agrícola, los ingresos netos por unidad de superficie de maíz están disminuyendo, por lo anterior, es necesario que los agricultores traten de optimizar el uso del N como fertilizante. La utilización más eficiente del N puede lograrse mediante el uso de técnicas de manejo y también con el uso de genotipos que absorban y metabolicen el N de una manera más eficiente (Gallais y Hirel, 2004).

4.4 Absorción de nitrógeno

Bertsch (2005), indica que los estudios de absorción contabilizan la extracción de nutrimentos en el suelo por un cultivo para completar su ciclo de producción y para producir un determinado rendimiento en un tiempo definido. Cada variedad puede presentar características particulares de comportamiento y producción que se pueden expresar en diferente capacidad para absorber nutrimentos. La posibilidad de contar con información sobre el consumo de nutrimentos y la dinámica de absorción, permite estimar las recomendaciones de fertilización.

Las diferencias en la absorción de N, están estrechamente relacionadas con la cantidad y calidad del sistema radicular. No obstante mientras algunos experimentos han mostrado variabilidad en la arquitectura del sistema radicular, no se ha encontrado relación con la variabilidad en la absorción de N.

La absorción de N por las plantas es importante para su crecimiento. Por lo anterior es que la fertilización con N ha sido utilizada para incrementar el rendimiento de los cultivos como los cereales (Gallais y Hirel, 2004).

La producción de materia seca, y acumulación de nutrimentos por el cultivo maíz, *Zea mays* L., es afectada por diferentes prácticas de manejo como tipo de labranza y fertilización nitrogenada (Kamprath, 1987). Así mismo, el patrón de acumulación de N depende del tipo de híbrido como lo indican Tsai *et al.* (1991), quienes señalan que los híbridos de alta respuesta a la aplicación del elemento extienden su absorción aún hasta el final del ciclo del cultivo, contrario a los híbridos de bajo requerimiento del

elemento los cuales absorben gran proporción de sus nutrimentos en las primeras etapas de crecimiento del cultivo. Otros investigadores, Ma *et al.* (1999) han destacado diferencias en el patrón de acumulación de N de diferentes híbridos de maíz.

El conocimiento del patrón de producción de materia seca y de patrón de acumulación de nutrimentos por el cultivo de maíz, y de las relaciones entre ellos, así como los aspectos de manejo del sistema agrícola que afectan los mismos, podría ser de utilidad para el manejo eficiente de la fertilización nitrogenada, mediante la determinación de dosis y épocas apropiadas de aplicación de los mismos, y para garantizar el suministro apropiado y oportuno de nutrimentos requeridos para la producción del cultivo.

Las diferencias en la habilidad de los híbridos en absorber N durante el llenado del grano señaladas por Ma *et al.* (1999) deberían complementarse con estrategias de fertilización que permitan mantener altos contenidos de N mineral en el suelo durante ese período. Se sugiere que el mantenimiento del área foliar verde por períodos más prolongados, y la capacidad de tomar N del suelo en la etapa de llenado de grano son algunas de las características de híbridos de maíz de alta eficiencia de utilización de N.

4.5 Eficiencia en el uso de nitrógeno

La eficiencia es la habilidad de un sistema de convertir insumos en productos deseados, minimizando la conversión de insumos a productos. La cantidad de nutrimentos minerales puede ser considerada como un insumo, mientras que el crecimiento de la planta, su actividad fisiológica o su rendimiento son los productos (Lynch, 1998).

Cada variedad de una misma especie, puede también presentar características particulares de comportamiento y producción, expresadas en diferentes capacidades para la absorción y utilización de los nutrimentos. Es por ello, importante hacer evaluaciones en diferentes genotipos de maíz, con el fin de determinar materiales eficientes e incorporarlos en los sistemas agroproductivos, lo cual traerá beneficios,

económicos a los productores y ecológicos al haber un mayor aprovechamiento del fertilizante (Bertsch, 2005).

La EUN para el maíz en grano fue definida por Moll *et al.* (1987) como el rendimiento de grano por unidad de N del suelo incluyendo los fertilizantes. Asimismo, la EUN también puede desglosarse como el producto de la eficiencia de absorción de N (EABN). Es decir, el N absorbido en relación al N del suelo⁻¹, y la eficiencia de utilización (EUTN) es el rendimiento en grano por N absorbido⁻¹. Desde el punto de vista fisiológico la EUN se define como la relación entre rendimiento de materia seca en relación al N absorbido⁻¹, asimismo la eficiencia en la utilización de N corresponde al recíproco del contenido de N en la planta.

Como consecuencia de la ley de incrementos decrecientes, la eficiencia en el uso del N (EUN) actualmente es menor que en el pasado, cuando se utilizaba una menor fertilización nitrogenada (Gallais y Coque, 2005)

Ya se ha considerado a la variabilidad genética en la EUN para grano de maíz y sus componentes de acuerdo al nivel de N en la fertilización (Balko y Russel, 1980; Muruli y Paulsen, 1981; Di Fonzo *et al.*, 1982; Russel, 1984; Moll *et al.*, 1987; Brun y Dudley, 1989; Rizzi *et al.*, 1993; Lafitte y Edmeades, 1995; Bänziger *et al.*, 1997; Bertin y Gallais, 2000; Presterl *et al.*, 2003; Beltrán *et al.*, 2003; Zaidi *et al.*, 2003).

En niveles altos de N, la variación genética en EUN se explica por la variación en la absorción de N, mientras que en niveles bajos de N, la variabilidad se debe principalmente a diferencias en la utilización del N. Esto sugiere que los aspectos limitantes en la asimilación del N pueden ser diferentes cuando las plantas se cultivan en niveles altos o bajos de fertilización nitrogenada. Las diferencias en la absorción del N tienden a estar relacionadas con la cantidad y calidad del sistema radicular. Aunque los estudios agronómicos sobre el maíz han demostrado que existe variabilidad genética para la EUN, los conocimientos sobre la fisiología del maíz son todavía limitados (Gallais y Hirel, 2004).

La variación genética se puede estudiar desde dos puntos de vista que son complementarios, el primero es saber si existe una variación genética de la EUN para un nivel de fertilización dado, y el segundo es saber si existe una interacción entre genotipos y dosis de fertilización N (Gallais y Coque, 2005).

Aunque los estudios agronómicos en maíz demostraron que hay variabilidad genética para la EUN, el conocimiento presente en relación a los aspectos fisiológicos involucrados, es todavía limitado. Varios reportes asignan actividades para diferentes proteínas y enzimas involucradas en la absorción, asimilación y reciclaje del N (Lea y Ireland, 1999).

4.6 Mejoramiento genético para eficiencia en el uso de nitrógeno

O'Neill *et al.* (2004) hacen notar que el mejoramiento de plantas hasta años recientes, se enfocó en la selección de genotipos con altos potenciales de rendimiento en condiciones de altos niveles de N en el suelo, en general los cultivares generados por los programas de mejoramiento genético, son altamente productivos y de buena respuesta a la aplicación de N, sin embargo tienen una baja eficiencia en el uso de este nutrimento.

El entendimiento de los procesos asociados a la eficiencia en el uso de N, especialmente en relación a sus componentes primarios (eficiencia de absorción y utilización del N), se encuentran entre los factores más importantes para determinar las estrategias para el manejo y desarrollo de cultivares en los programas de mejoramiento genético con el fin de mejorar la eficiencia en el uso de nutrimentos (Uribelarrea *et al.*, 2007).

Es deseable combinar los objetivos de mejoramiento para condiciones de altos insumos en fertilizantes nitrogenados y mejoramiento en rendimiento para bajos insumos de bajo N. En principio siguiendo estas dos estrategias de mejoramiento son posibles: 1) mejoramiento indirecto: selección a un solo nivel de N, mientras el desempeño a otros niveles de N es mejorado a condiciones de bajos insumos de

fertilizante nitrogenado por respuesta correlacionada y 2) mejoramiento combinado: selección basado en un índice de desempeño medio ponderado a bajos insumos de bajo N. Si la combinación de estos dos objetivos de mejoramiento prueba ser inefectiva, será necesario mejorar para alto N y bajo N en ambientes separados.

Para decidir cuál de las dos estrategias es la más adecuada, los conocimientos de los parámetros de genética cuantitativa, tales como componentes de varianza genotípica, heredabilidad y coeficientes de correlación genotípica así como los rendimientos bajo condiciones de alto y bajo N (Atlin *et al.*, 2000).

El desarrollo de variedades mejoradas de maíz será mayor con el conocimiento de las bases fisiológicas y genéticas de la EUN (Gallais y Coque, 2005) y la utilización de variedades mejoradas de maíz que poseen elevadas tasas de absorción, asimilación y/o redistribución del N desde las estructuras vegetativas hacia las reproductivas puede ser un elemento tecnológico fundamental en los sistemas agrícolas (Hernández *et al.*, 2003).

5. Literatura citada

- Atlin, G. N., R. J. Baker, K. B. McRae, and X. Lu. 2000. Selection efficiency and its relationship to other traits in corn. *Crop Sci.* 40:7–13.
- Balko, L. G., W. A. Russell. 1980. Effects of rates of nitrogen fertilizer on corn inbredlines and hybrid progeny. I. Prediction of yield response. *Maydica* 25:65-79.
- Bänziger, M., J. Beltran, H. R. Lafitte. 1997. Efficiency of high nitrogen selection. environments for improving corn for low nitrogen target environments. *Crop Sci.* 37:1103-1109.
- Bänziger, M., G. O. Edmeades, H. R. Lafitte. 2002. Physiological mechanisms contributing to the increased N stress tolerance of tropical corn selected for drought tolerance. *Field Crops Res.* 75:223–233.
- Brun, E. L., J. W. Dudley. 1989. Nitrogen response in the USA and Argentina of corn populations with different proportions of flint and dent germplasm. *Crop Sci.* 29:565-569.

- Bertin, P., A. Gallais. 2000. Physiological and genetic basis of nitrogen use efficiency in corn. I. Agrophysiological results. *Maydica* 45:53-66.
- Bertsch, F. 2005. Estudios de Absorción de nutrientes como apoyo a las recomendaciones de fertilización. *Informaciones Agronómicas*. Instituto de la Potasa y el Fósforo. San José, Costa Rica. pp 1-10.
- Betanzos M. E., S. Pandey, F. A. Ramírez. 1996. Mejoramiento genético de maíces tropicales tolerantes a suelos ácidos. Proyecto de Investigación Interno Campo Experimental Centro de Chiapas, Ocozocoautla, Chis. México: SAGAR-INIFAPCIMMYT. 1996. p. 60-73. (mimeografiado).
- Betrán, F. J., D. Beck, M. Bänziger, G. O. Edmeades. 2003. Genetic analysis of Inbred lines and hybrid grain yield under stress and non-stress environments in tropical corn. *Crop Sci.* 43:807–817.
- Cruz-Flores, G., D. Flores-Román, G. Alcántara-González, A. Trinidad-Santos, R. Vivanco Delgado R. 2002. Evaluación de crecimiento del maíz y absorción de nitrógeno bajo diversas condiciones de disponibilidad del elemento en un Mollisol de Venezuela. *Agronomía Tropical* 52(1):5-22.
- Di Fonzo, N. M. Motto, T. Maggiore, R. Sabatino, F. Salamini. 1982. N uptake, translocation and relationships among N related traits in corn as affected by genotype. *Agronomie* 2:789-796.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations FAO. 2000. FAO Statistical Databases [Online]. [1 p.] Available at: <http://apps.fao.org/> [verified 10 Jan. 2003]. FAO, Rome.
- Gallais, A., B. Hirel. 2004. An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in corn. *J. Exp. Bot.* 55:295-306.
- Gallais, A., M. Coque. 2005. Genetic variation and selection for nitrogen use efficiency in corn, a synthesis. *Maydica* 50:531-547.
- Hernández A. V., Barrientos, A. Chassaigne, J. Alezones. 2003. Evaluación y selección de poblaciones y líneas de maíz (*Zea mays* L.) eficientes en la asimilación de nitrógeno. *Bioagro* 15(2):115-120.
- Kamprath, E. J. 1987. Enhanced phosphorus status of corn resulting from nitrogen fertilization of high phosphorus soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:522-526.
- Lafitte, H. R., G. O. Edmeades. 1995. Association between traits in tropical corn inbred lines and their hybrids under high and low soil nitrogen. *Maydica* 40:259-267.

- Lea, P. J., R. J. Ireland. 1999. Plant amino acids. In: Singh BK, ed. Nitrogen metabolism in higher plants. New York, Basel, Hong Kong: Marcel Dekker Inc, pp 1-47.
- Lynch, J. 1998. The role of nutrient-efficient crops in modern agriculture. *In* Z. Rengel (ed.) Nutrient use in crop production. Haworth Press, Inc., New York. pp. 241–261.
- Ma, B. L., L. M. Dwyer, E. G. Gregorich. 1999. Soil nitrogen amendment effects on nitrogen uptake and grain yield of corn. *Agron. J.* 91:650-656.
- Moll, R. H., E. J. Kamprath, W. A. Jackson. 1987. Development of nitrogen efficient prolific hybrids of corn. *Crop Sci.* 27:181-186.
- Monneveux, P., P. H. Saidi, C. Sánchez. 2005. Population density and low nitrogen affect yield-associated traits in tropical corn. *Crops Sci.* 44:535-545.
- Muruli, B. I., G. M. Paulsen. 1981. Improvement of nitrogen use efficiency and its relationship to other traits in corn. *Maydica* 26:63-73.
- O'Neill, P. M., J. F. Shanahan, J. S. Schepers, B. Caldwell. 2004. Agronomic responses of corn hybrids from different eras to deficit and adequate levels of water and nitrogen. *Agronomy J.* 96:1660-1667.
- Peña-Cabriales, J. J., O. A. Grajeda-Cabrera, y J. A. Vera-Núñez. 2001. Manejo de los fertilizantes nitrogenados en México: Uso de las técnicas isotópicas (15N). *Terra.* 20:51-56.
- Prestler, T., G. Seitz, M. Landbeck, E. M. Thiemt, W. Schmidt, H. H. Geiger. 2003. Improving Nitrogen-Use Efficiency in European Corn. Estimation of Quantitative Genetic Parameters. *Crop Sci.* 43:1259-1265.
- Rizzi, E., C. Balconi, L. Nembrini, F. M. Stefanini, F. Coppolino, M. Motto. 1993. Genetic variation and relationships among N-related traits in corn. *Maydica* 38:23-30.
- Russell, W. A. 1984. Further studies on the response of corn inbred lines to N fertilizer. *Maydica* 29:141-150.
- Turrent-Fernández, A., R. J. Laird, J. I. Cortés F., A. Barrios A. 2005. Revisiting agroecosystem productivity II: Validity for adapting technology to corn in México. *Agrociencia.* 39:149-159.
- Tsai, C. Y., D. M. Huber, H. L. Warren and A. Lyznik. 1991. Nitrogen uptake and redistribution during maturation of corn hybrids. *J. Sci. Food Agric.* 57:175-187.

Uribelarrea, M., S. P. Moose, F. E. Below. 2007. Divergent selection for grain protein affects nitrogen use in corn hybrids. *Field Crops Research* 100:82-90.

Zagal E. 2003. Eficiencia en el uso del nitrógeno. *Agricultura Técnica*. 63 (3):299-310.

Zaidi, P. H., G. Srinivasan, C. Sánchez. 2003. Relationship between line per se and cross performance under low nitrogen fertility in tropical corn. *Maydica* 48:221-231.

CAPÍTULO I. ABSORCIÓN, CONTENIDO Y EFICIENCIA DE USO DE MACRONUTRIMENTOS EN MAÍZ

ABSORPTION, CONTENT AND EFFICIENCY USE OF MACRONUTRIENTS IN CORN

Luis Carlos Alvarado Gómez¹
Catalino Jorge López Collado¹
Arturo Pérez Vázquez¹
Carlos Alberto Tinoco Alfaro²
Otto Raúl Leyva Ovalle³
Alejandro Alonso López¹

Resumen

El objetivo de este estudio fue el analizar las cantidades de los elementos nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) en maíz (*Zea mays* L.) y sus interacciones, con el fin de entender los procesos de absorción y mejorar la eficiencia de la fertilización.

Se utilizaron 32 plantas de maíz sembradas en macetas y cosechadas 35 días después de la emergencia. Las variables estudiadas fueron: el peso seco de hojas y tallo (MS), la absorción de los elementos en porcentaje y en gramos por planta, la eficiencia en el uso del elemento, para N, P, K, Ca y Mg. Se realizaron análisis de varianza (Tukey, p 0.05) y matriz de correlación.

Los resultados indican que de los cinco elementos estudiados, solamente el N, P y K se comportaron en forma similar al esquema de herencia mendeliano para las variables absorción (%) y eficiencia. Que la absorción de macronutrientes en gramos planta⁻¹ no está bajo control genético, ya que se demostró que este valor estuvo influido por condiciones ambientales. El contenido y eficiencia de macronutrientes en la planta mostraron comportamiento similares. Estuvieron correlacionadas las interacciones N y P, P y Ca, P y Mg, y Ca y Mg.

Palabras clave: *Zea mays*, absorción de macronutrientes, herencia mendeliana.

¹Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz. Km. 88.5 Carretera Xalapa-Veracruz. Apdo. Postal 421, C.P. 91700, Veracruz. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. ³Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba. Autor para correspondencia (ljorge@colpos.mx)

Abstract

The aim of this study was to analyze the amounts of the elements nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) in corn (*Zea mays* L.) and its interactions to understand the processes of absorption and improve the efficiency of fertilization.

A total of 32 corn plants grown in pots and harvested 35 days after emergence. The variables studied were: dry weight of leaves and stems (MS), absorption of the elements in percent and grams per plant, the efficiency of the element, for N, P, K, Ca and Mg. Analysis of variance and correlation matrix were performed.

The results indicate that the five elements studied, only N, P and K behave similarly to Mendelian inheritance scheme for variable absorption (%) and efficiency. The analysis of the data indicates that the absorption of macronutrients in grams per plant is not under genetic control, as it was shown that this variable was influenced by environmental conditions. The content and efficiency of macronutrients in the plant showed similar behavior. There was a positive correlation among P N, P and Ca, P and Mg, and Ca and Mg.

Key words: *Zea mays*, absorption of macronutriments, mendelian heredity.

1.1. Introducción

El maíz ocupa a nivel mundial el tercer lugar en importancia después del trigo y el arroz. El cultivo del maíz en México cubre una superficie anual aproximada de ocho millones de ha (SAGAR, 2000), de las cuales el 94 % corresponde al ciclo Primavera-Verano (PV) y 6 % al ciclo de Otoño-Invierno (OI). Del total, 88 % se siembra en condiciones de temporal, con 40 % en el trópico húmedo, debido a que en esta zona la precipitación pluvial ocurre en mayor cantidad y mejor distribución, por lo que se considera una zona apropiada para el cultivo del maíz (Rodríguez, 1990).

El maíz es un producto básico en la alimentación del mexicano, donde las necesidades de una población en constante aumento y la reducción de la superficie dedicada al cultivo obligan a buscar genotipos con mejor adaptación a las condiciones de cada región.

Considerando que uno de los insumos más importantes para elevar los rendimientos agrícolas es la fertilización. Por ello, es muy importante conocer cuáles son las dosis adecuadas para cada localidad, genotipo y tipo de suelo para obtener rendimientos óptimos (Melgar y Díaz-Zorita, 1997).

La materia seca producida por la planta de maíz consiste en materiales orgánicos de carbono que resultan de la fotosíntesis y de los procesos subsecuentes. Se requiere de 16 elementos químicos para que la planta se desarrolle y sea productiva. Un abastecimiento de la cantidad adecuada de cada nutriente durante cada una de las etapas de desarrollo de la planta es esencial para el desarrollo óptimo del cultivo (Bertsch, 2005).

Los estudios de absorción contabilizan la extracción de nutrimentos en el suelo por un cultivo para completar su ciclo de producción y para producir un determinado rendimiento en un tiempo definido. Cada variedad puede presentar características particulares de comportamiento y producción que se pueden expresar en diferente

capacidad para absorber nutrimentos. La posibilidad de contar con información sobre el consumo de nutrimentos y la dinámica de absorción, permite estimar las recomendaciones de fertilización (Bertsch, 2005).

De acuerdo con Yamada (2002) el máximo flujo de nutrimentos hacia las raíces se produce durante los primeros 20 días iniciales de desarrollo de la planta. La tasa de absorción de N a los 30 días es siete veces menor que a los 20 días, y a los 50 días es 20 veces menor.

La determinación de la cantidad de absorción de nutrimentos y la producción de materia seca de maíz se utilizan para determinar la dosis y épocas de aplicación de fertilizantes e incrementar la eficiencia de uso de los nutrimentos (Delgado, 2002). La eficiencia nutrimental se define como la capacidad para producir mayor cantidad de biomasa seca por unidad mineral aplicada o absorbida (Fragaria *et al.*, 1997).

Uno de los problemas actuales de la nutrición por elementos minerales es la eficiencia con la cual las plantas pueden usar los elementos (Peña-Cabriales *et al.*, 2001). Es importante que los elementos incorporados al suelo sean usados con eficiencia, tanto por su elevado costo económico como por los impactos ambientales que estos pueden provocar. De este modo, el uso eficiente de los fertilizantes constituye uno de los factores para mantener la producción de alimentos a un nivel satisfactorio y mitigar el impacto ambiental que éstos causan.

La nutrición mineral de los cultivos está bajo un control genético y está indicada por numerosas diferencias nutricionales entre cultivares. La evidencia proviene de estudios de herencia involucrando cultivares con diferentes requerimientos nutricionales (Marshner, 1995). Por lo anterior, es importante entender la eficiencia en la absorción de nutrimentos en plantas de maíz.

Debido a lo anterior, el objetivo de este estudio fue analizar los patrones de absorción de los elementos N, P, K, Ca y Mg en maíz y sus interacciones, con el propósito de entender algunos procesos involucrados.

1.2 Materiales y métodos

1.2.1 Área de estudio

El experimento se llevó a cabo del 24 de febrero al 7 de abril del 2007 bajo condiciones de campo en el Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz en el predio Tepetates, municipio de Manlio Fabio Altamirano (19.27 ° LN, 96.27 ° LO, 36 msnm).

1.2.2 Análisis estadístico

Se utilizaron 32 plantas de maíz sembradas en macetas. Bajo diferentes condiciones de manejo. Involucrando dos genotipos de semilla (hibrido “DK-234” y el criollo “Olotillo”), dos niveles de nitrógeno (0 y 140 kg N ha⁻¹), dos tipos de suelo (migajón-arenoso y franco) y dos niveles de cal (con y sin cal agrícola). Con la combinación de estos factores se formaron 16 combinaciones, dos macetas por combinación, con el propósito de que se expresaran las diferencias de absorción de nutrimentos. Se analizaron tres matrices de correlación para la absorción, el contenido, y la EU de N, P, K, Ca y Mg, en gramos por planta, con el uso del programa *Statistica*®.

1.2.3 Características de los suelos en estudio

Se utilizó suelo de dos regiones productoras de maíz del municipio de Acayucan, Ver. La Colonia Hidalgo (Suelo A) y la Colonia Agrícola Michapan (Suelo B). Los análisis fisicoquímicos de los suelos se realizaron en el Laboratorio del Colegio de Postgraduados. Campus Veracruz (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características fisicoquímicas de los suelos en estudio.

Característica	Suelo A	Suelo B
Textura	Migajón-arenoso	Franco
Arena	76.7%	41.8%
Limo	8.0%	31.8%
Arcilla	16.3%	26.4%
pH	4.7	5.5
Materia orgánica	2.3% (medio)	2.9% (medio)
Nitrógeno total	0.11% (medio)	0.14% (medio)
Fósforo	1 ppm (muy bajo)	4 ppm (bajo)
Potasio	50 ppm (bajo)	100 ppm (medio)
Calcio	960 ppm (bajo)	2,160 ppm (moderadamente alto)
Magnesio	37 ppm (medio)	487 ppm (muy alto)

1.2.4 Siembra

La siembra se realizó en macetas (20 cm de diámetro y 40 cm de largo). En cada maceta se depositaron tres semillas a una profundidad de 3 cm, ubicándolas en el centro de la misma. Una vez germinadas, se seleccionó una planta por maceta, eliminando las restantes. Las macetas se acomodaron de tal modo que la distancia entre plantas y filas fuera de 20 cm y 40 cm.

1.2.5 Fertilización

Esta se realizó de acuerdo con las recomendaciones del INIFAP (Tinoco *et al.*, 2002) para maíz en la región de Acayucan, Ver. La fórmula de fertilización aplicada fue equivalente a 140-60-60, kilogramos de NPK por ha. La dosis fue fraccionada en dos partes: La primera que coincidió al momento de la siembra se aplicó todo el P, K y la mitad del N y 20 días después de la siembra (dds) la otra mitad del N. Las fuentes utilizadas fueron: urea, superfosfato triple de calcio, y cloruro de potasio.

1.2.6 Aplicación de cal

En el laboratorio se realizaron titulaciones con hidróxido de sodio (NaOH) para determinar las necesidades de cal en el suelo, y llevar el pH del suelo de 4.7 (suelo A) y 5.5 (suelo B) a 7.0, utilizando la metodología descrita por Ortega (1981). Se utilizó cal dolomítica, con un grado de pureza del 78 %, y fue aplicada al momento de la siembra a diferentes dosis: 2.7 t ha⁻¹ y 0.9 t ha⁻¹, para el suelo A y suelo B.

1.2.7 Riegos

Se aplicaron riegos de acuerdo a las necesidades hídricas de los tratamientos, con base en la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. La humedad del suelo se mantuvo entre el 60 al 75 % de humedad aprovechable, utilizando una regadera de jardín.

1.2.8 Toma de muestras vegetales

Las muestras de tejido vegetal se tomaron a los 35 dds. Se utilizaron tijeras de podar para cortar por separado la parte aérea de las plantas de maíz (hojas y tallo) y se acomodaron en bolsas de papel etiquetadas con el número de tratamiento y repetición correspondiente. Las raíces fueron lavadas para eliminar fragmentos de suelo, utilizando agua de la llave. Las raíces se colocaron en bolsas de papel previamente etiquetadas. Las muestras fueron secadas en una estufa de aire forzado a una temperatura de 60 °C hasta peso constante.

1.2.9 Análisis químico de las muestras

El análisis vegetal de hojas y tallos se realizó en el Laboratorio de Alta Tecnología de Orizaba S. C. (LATO). El peso seco de hojas y tallos se hizo por gravimetría, el N por el método Kjeldal. Las muestras fueron previamente incineradas a 550 °C y la redisolución de las cenizas permitió la determinación de los elementos Ca, Mg y K a través de espectrofotometría de absorción atómica. El P se determinó por UV-VIS.

1.2.10 Variables registradas

Se analizaron 15 variables, agrupadas en: absorción y contenido de N, P, K, Ca y Mg en gramos por planta y porcentaje. Se determinó la eficiencia de uso (EU) de cada elemento. La EU de cada elemento estuvo definida por la fórmula matemática: EU del elemento = gramos de peso seco de hojas y tallo /gramos de elemento absorbido.

1.3 Resultados y discusión

Los minerales del suelo no pueden entrar en las células vegetales por simple difusión, asimismo se ha demostrado experimentalmente que tampoco ingresan a la planta en proporción del agua absorbida.

Los minerales que sirven a la planta como nutrientes inorgánicos para construir sus moléculas de proteínas, enzimas, ácidos nucleicos, etc. se toman del suelo en forma de iones (los iones son formas químicas con cargas eléctricas, los iones con carga positiva son llamados cationes y los de carga negativa aniones).

El mecanismo por el cual los iones entran a la planta ha sido muy discutido, al proceso se le denomina intercambio iónico, Sin embargo, se ha demostrado que, existen condiciones de clima, suelo y planta que favorecen esta absorción de minerales, tales como temperaturas, pH y contenido de agua en el suelo, longitud y densidad radicular de la planta, entre otras.

La cantidad de nutrimento absorbida por una planta se obtiene de la relación entre el peso seco de los tejidos y la concentración de nutrimentos en estos tejidos (Bertsch, 2005).

Al analizar la matriz de correlaciones para la absorción de elementos en gramos por planta se encontró que la mayoría de las interacciones (N y P, N y K, N y Ca, N y Mg, P

y K, P y Ca, P y Mg, K y Mg y Ca y Mg) presentaron significancia ($p < 0.05$) con excepción de K y Ca (Cuadro 2).

Estos valores indican correlaciones positivas y se interpreta que cuando los tratamientos presentaban condiciones de pH, textura y deficiencia de N en el suelo, así como las temperaturas desfavorables. Las plantas absorbieron cantidades pequeñas de los cinco elementos. Mientras que en los tratamientos con condiciones favorables se absorbieron mayores cantidades de todos los elementos estudiados. Esto se debió a que la absorción de nutrimentos es una función fisiológica que no depende directamente de genes, más bien depende de condiciones ambientales y de la longitud y densidad radicular de las plantas de maíz.

Cuadro 2. Matriz de correlación para la absorción de elementos en gramos por planta del experimento, absorción de macronutrimentos en maíz.

	N (g)	P (g)	K (g)	Ca (g)	Mg (g)
N (g)	1.00				
P (g)	0.80 **	1.00			
K (g)	0.63 **	0.40 *	1.00		
Ca (g)	0.43 *	0.65 **	0.24	1.00	
Mg (g)	0.74 **	0.67 **	0.55*	0.71 **	1.00

*, ** Correlación significativa a $p < 0.05$ y 0.01 de probabilidad, respectivamente.

Para contenido de nutrimentos en porcentaje, se encontró una correlación significativa y positiva, para N y P, P y Ca, P y Mg, y Ca y Mg (Cuadro 3). Es decir, existe un sinergismo entre estos elementos y esto ocurre, cuando un ion favorece la absorción de otro o refuerza su actividad metabólica. Estos elementos están asociados en su absorción por la planta. Esta respuesta está reportada en la literatura y puede interpretarse como que los elementos N y P, así como P y Ca, P y Mg y finalmente Ca y Mg, podrían estar involucrados en un mismo sistema de genes y el nitrógeno como elemento aislado en otro sistema de genes.

Cuadro 3. Matriz de correlación para el contenido en (%) † de elementos del experimento, Absorción de Macronutrientes en maíz.

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
N (%)	1.00				
P (%)	0.80 *	1.00			
K (%)	0.04	-0.28	1.00		
Ca (%)	-0.14	0.48 *	-0.14	1.00	
Mg (%)	0.09	0.35 *	-0.01	0.58 **	1.00

*,** Correlación significativa a $p < 0.05$ y 0.01 de probabilidad, respectivamente.

† Se utilizó la transformación raíz cuadrada para los datos originales.

La más alta de las correlaciones, es la establecida entre N y P, ($r=0.8$, $p < 0.05$), lo cual está demostrado el efecto del nitrógeno en el aumento de la absorción de fósforo (Yamada, 2002).

Se conoce que el N aumenta la absorción del P, por la planta cuando se colocan juntos en el suelo. El efecto es mayor con el N-NH₄ que con el N-NO₃, debido a la reducción del pH en la superficie de la raíz provocada por la absorción del NH₄. Esto aumenta la disponibilidad de P para la absorción por las plantas (Yamada, 2002).

En relación a la matriz de correlación para la eficiencia en el uso de los nutrientes, se encontró que al igual que la matriz para contenido en (%) de elementos, existen elementos asociados y coincide en las relaciones, pudiera esto indicar que, efectivamente están en sistemas de genes afines (Cuadro 4), de acuerdo con Marshner (1995), quien establece que algunas características de la nutrición mineral, están bajo control genético de un par de genes.

Cuadro 4. Matriz de correlación para la eficiencia en el uso de elementos del experimento, Absorción de Macronutrientes en maíz.

	EuN	EuP	EuK	EuCa	EuMg
EuN	1.00				
EuP	0.42 *	1.00			
EuK	-0.01	-0.21	1.00		
EuCa	-0.25	0.44 *	-0.12	1.00	
EuMg	0.01	0.48 *	-0.04	0.69 **	1.00

*,** Correlación significativa a $p < 0.05$ y 0.01 de probabilidad, respectivamente.

1.4 Conclusiones

La absorción de macronutrientes en gramos por planta depende de factores de clima y suelo, es por eso que todos ellos están correlacionados, de manera positiva. El maíz absorbe pequeñas o grandes cantidades de nutrientes dependiendo de condiciones ambientales.

En relación a la absorción de elementos medido en porcentaje, se encontró un equilibrio donde no importó el tamaño de la planta. El porcentaje de elementos fueron constantes en plantas chicas y grandes.

Se encontraron interacciones significativas entre N y P, P y Ca, P y Mg, y Ca y Mg.

La absorción de elementos medidos en porcentaje y la eficiencia en el uso de estos elementos son semejantes ya que las mismas correlaciones entre elementos resultaron significativas.

1.5. Literatura citada

Bertsch, F. 2005. Estudios de Absorción de nutrientes como apoyo a las recomendaciones de fertilización. Informaciones Agronómicas. Instituto de la Potasa y el Fósforo. San José, Costa Rica. pp 1-10.

- Delgado R. 2002. Evaluación de crecimiento del maíz y absorción de nitrógeno bajo diversas condiciones de disponibilidad del elemento en un Mollisol de Venezuela. *Agronomía Tropical* 52(1):5-22.
- Fageria, N. K., V. C. Baligar y C. A. Jones. 1997. Growth and mineral nutrition of fields crops. 2a Ed. Marcel Dekeer Inc. USA. pp:5-37.
- Marshner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. USA. pp:14-42.
- Melgar R., M. Díaz-Zorita. 1997. La Fertilización de Cultivos y Pasturas. Ed. Hemisferio Sur S. A. Buenos Aires, Argentina. pp:93-110.
- Ortega T. E. 1981. Química de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. México. pp:34-70.
- Peña-Cabriales, J. J., O. A. Grajeda-Cabrera, y J. A. Vera-Núñez. 2001. Manejo de los fertilizantes nitrogenados en México: Uso de las técnicas isotópicas (^{15}N). *Terra*. 20:51-56.
- Rodríguez V. J. 1990. México y su Agricultura. Colegio de Postgraduados. México. 136 p.
- SAGAR. 2000. Centro de Estadística Agropecuaria (CEA). Avance de siembras y cosechas Primavera-Verano 2000. Resumen nacional por cultivos. México. 232 p.
- Tinoco-Alfaro, C. A., F. A. Rodríguez-Montalbo, J. A. Sandoval-Rincón, A. Palafox-Caballero, V. A. Esqueda-Ésquivel, M. Sierra-Macias, J. Romero-Mora. 2002. Manual de producción de maíz para los estados de Veracruz y Tabasco. INIFAP. Libro técnico num. 9. Veracruz, México. 113 p.
- Yamada, T. 2002. Melhoría na eficiencia da abudacao aproveitando as interações entre os nutrientes. *Informaciones Agronómicas. Potafos* 100: 1-5.

CAPÍTULO II. PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA, ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y EFICIENCIA EN EL USO DE NITRÓGENO EN MAÍZ

DRY MATTER PRODUCTION, NITROGEN ABSORPTION AND NITROGEN USE EFFICIENCY IN CORN

Luis Carlos Alvarado Gómez¹
Catalino Jorge López Collado¹
Arturo Pérez Vázquez¹
Carlos Alberto Tinoco Alfaro²
Otto Raúl Leyva Ovalle³
Alejandro Alonso López¹

Resumen

En los sistemas de producción agrícola, los paquetes tecnológicos recomendados por las instituciones de investigación, consideran como principal objetivo un alto rendimiento económico.

Esto ha provocado el incremento en el uso de insumos con un impacto ambiental en ocasiones negativo. Por ello, es necesario evaluar la eficiencia de los sistemas agroproductivos en términos de la cantidad de insumo aplicado. Por tanto, el propósito de este estudio fue determinar la producción de materia seca, la absorción de nitrógeno (N) y la eficiencia en la utilización del N bajo diferentes condiciones de manejo en maíz (*Zea mays* L.). El experimento se desarrolló en el Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, del 24 de febrero al 7 abril del 2007. Se evaluaron 16 tratamientos, con cuatro factores: tipo de suelo (migajón-arenoso y franco), genotipo (semilla híbrida "DK-234" de la compañía Monsanto y la variedad criolla "Olotillo"), nitrógeno (0 y 140 kg N ha⁻¹), con y sin cal agrícola. Se utilizó un arreglo ortogonal Taguchi L 8⁻¹ bajo un diseño de bloques al azar, con cuatro repeticiones.

¹Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz. Km. 88.5 Carretera Xalapa-Veracruz. Apdo. Postal 421, C.P. 91700, Veracruz. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. ³Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba. Autor para correspondencia (ljorge@colpos.mx)

Las plantas se sembraron en macetas y se mantuvo bajo control la humedad del suelo. Los pesos secos de hojas y raíces, mostraron diferencias estadísticas ($\alpha > 0.05$) a favor de la aplicación de N. La absorción de N en porcentaje no mostró diferencia para ninguno de los factores estudiados, ni sus interacciones, mientras que la absorción de N, en gramos, fue mayor en plantas fertilizadas. La eficiencia en el uso de N fue mayor en plantas no fertilizadas, asimismo la interacción suelos por N resultó significativa.

Palabras clave: *Zea mays*, arreglo Taguchi, eficiencia nutrimental.

Abstract

In agricultural production systems technology packages recommended by research institutions, considered as a target a high economic return. This has led to the use of inputs and environmental impact. It is therefore necessary to evaluate the efficiency of agro-productive systems in terms of the amount of input applied. Therefore, the purpose of this study was to determine the dry matter production, uptake of nitrogen (N) and utilization efficiency under different N management in corn (*Zea mays* L.).

The experiment was conducted in pots in the Graduate College Campus Veracruz, from February 24 to April 7, 2007. 16 treatments were evaluated, with four factors: soil type (loam, sandy loam), genotype (hybrid seed DK-234; by the company Monsanto and landrace Olotillo), nitrogen (0 and 140 kg N ha⁻¹), with and without agricultural lime. We used a Taguchi orthogonal array L 8⁻¹ under a randomized block design with four replications. The dry weight of leaves and roots showed significant differences ($\alpha > 0.05$) in favor of the application of N. The N-uptake rate showed no difference for any of the studied factors or their interactions, while the absorption of N, in grams, was higher in fertilized plants. The efficiency of N was higher in unfertilized plants, soils also by N interaction was significant.

Key words: *Zea mays*, Taguchi methods, nutrimental efficiency.

2.1 Introducción

La producción de cultivos se relaciona con la modificación y el control de los factores de manejo que determinan un mayor rendimiento; donde el criterio es la combinación de factores que maximice el rendimiento económico. Sin embargo, son pocas las veces en que se analiza la eficiencia de los sistemas agroproductivos en función de la combinación de diversos factores de manejo.

La agricultura debe satisfacer las demandas de alimentos y materias primas de una población en aumento, minimizando al mismo tiempo los riesgos de contaminación del ambiente (Zagal, 2003). Se debe fomentar el uso de los sistemas de producción sustentables para preservar los recursos naturales. Un aspecto en el logro de la sustentabilidad de los agroecosistemas o lo que tiene que ver con agricultura sustentable es el mejoramiento en el uso de los nutrimentos y de la calidad del suelo.

Uno de los problemas de la nutrición mineral es la eficiencia con la cual las plantas pueden usar los elementos, en un escenario de incremento constante en el costo de los fertilizantes. El uso eficiente de los fertilizantes aplicados constituye uno de los factores para mantener la producción de alimentos a un nivel satisfactorio para cumplir con los requerimientos de la población y disminuir los costos de producción, incrementando la rentabilidad agrícola.

Fageria *et al.* (1997) establecen que la eficiencia nutrimental en los cultivos es la capacidad para producir mayor cantidad de biomasa seca por unidad de mineral aplicado o absorbido y las diferencias se atribuyen tanto a la eficiencia en la adquisición del nutrimento por las raíces como a la adecuada utilización de éste por la planta o a ambas características.

En relación a la eficiencia en el uso de nutrimentos, se ha encontrado lo siguiente: 1) Este es un mecanismo de adaptación de las plantas a condiciones de baja fertilidad (Retuerto y Woodward, 2003); 2) En variedades e híbridos de maíz los rendimientos y

las eficiencias son diferentes (Cruz-Flores *et al.*, 2002); 3) Las plantas con mayor rendimiento, no siempre son las más eficientes (Below, 2002) y 4). En maíz, existen diferencias en la eficiencia en el uso del N desde un 44 % hasta un 143 % (Christiansen y Lewis, 1987).

Gallais y Hirel (2004) consideran que mediante un conjunto de prácticas de manejo, tecnologías y mejoramiento genético se puede lograr eficiencias superiores al 85 % y que cada mejora en la eficiencia de uso del N, implica una reducción en las pérdidas del mismo y al incrementar la absorción repercute proporcionalmente en el retorno económico, principalmente en condiciones de altos costos del fertilizante.

El N es un elemento indispensable para la fotosíntesis. Es decir, para que las plantas fijen el carbono del aire, acumulen materia seca y produzcan rendimientos se requiere de cantidades suficientes de este elemento. Sin embargo, el N es un nutrimento usualmente deficiente para la agricultura (Cruz-Flores *et al.*, 2002). La eficiencia de uso depende del tipo de agroecosistema, cultivo y fertilizante aplicado, así como de las prácticas de manejo. Cualquier esfuerzo que se realice para conservar el N adicionado y tener la mayor tasa de absorción por las raíces, contribuye a aumentar la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado y se traduce en ahorro para productores y un menor daño al ambiente (Gallais y Hirel, 2004).

Cada variedad de una misma especie, puede también presentar características particulares de comportamiento y producción, expresadas en diferentes capacidades para la absorción y utilización de los nutrimentos. Es por ello, importante hacer evaluaciones en diferentes genotipos de maíz, con el fin de determinar materiales eficientes e incorporarlos en los sistemas agroproductivos, lo cual traerá beneficios, económicos a los productores y ecológicos al haber un mayor aprovechamiento del fertilizante (Bertsch, 2005).

Es necesario el entendimiento de las bases fisiológicas y genéticas de la eficiencia en el uso del nitrógeno. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la

producción de materia seca (MS), la absorción de nitrógeno (ABSN) y la eficiencia en el uso de nitrógeno (EUN) en maíz en diferentes condiciones de manejo, bajo la hipótesis de que existen factores de manejo que incrementan la (MS), (ABSN) y la (EUN).

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Área de estudio

El experimento se desarrolló bajo condiciones de campo del 24 de Febrero al 7 de Abril del 2007 en terrenos del Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz, en el predio Tepetates, municipio de Manlio Fabio Altamirano (19.27° latitud norte, y 96.27° longitud oeste, a una altitud de 36 msnm).

2.2.2 Tratamientos y diseño experimental

En un estudio exploratorio, se evaluaron 16 tratamientos, producto de la combinación de los factores: tipo de suelo (Migajón-arenoso y Franco), genotipo (semilla híbrida “DK-234” de la compañía Monsanto y la variedad criolla “Olotillo”), nitrógeno (0 y 140 kg N ha⁻¹) y con y sin cal agrícola. Los factores en estudio y los niveles se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Factores y niveles en estudio.

Factores	Nivel 1	Nivel 2
Tipo de suelo	Migajón-arenoso (S1)	Franco (S2)
Genotipo	Olotillo (G1)	DK-234 (G2)
Nitrógeno	0 kg ha ⁻¹ (N1)	140 kg ha ⁻¹ (N2)
Cal	Sin cal agrícola (C1)	Con cal Agrícola (C2)

Se utilizó un arreglo ortogonal Taguchi L 8⁻¹ (Stuart, 1993), bajo un diseño experimental de bloques al azar en con cuatro repeticiones por tratamiento. Taguchi, es un arreglo factorial, utilizado en estudios exploratorios, que reduce el número de tratamientos a evaluar en campo y tiene las ventajas de reducir el número de tratamientos, de unidades experimentales y el costo del experimento. Este diseño se basa en la

confusión de efectos, donde se pierde precisión en el estudio de las interacciones de alto grado, las cuales son difíciles de interpretar. Sin embargo, esta pérdida se compensa con el incremento en la precisión de los efectos principales (Padrón, 1996).

La asignación de tratamientos en campo fue al azar. Se identificó un gradiente de variación por luz, en función del recorrido del sol, de tal manera que los bloques se ubicaron de manera perpendicular a este gradiente.

2.2.3 Características de los suelos en estudio

Se utilizó suelo de dos regiones productoras de maíz del municipio de Acayucan, Ver. La Colonia Hidalgo (Suelo A) y la Colonia Agrícola Michapan (Suelo B). Los análisis de los suelos en estudio, se realizaron en el Laboratorio de Suelos del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, y sus características físicas y químicas se presentan el Cuadro 6.

Cuadro 6. Características físicas y químicas de los suelos en estudio.

Característica	Suelo A	Suelo B
Textura	Migajón-arenoso	Franco
Arena	76.7%	41.8%
Limo	8.0%	31.8%
Arcilla	16.3%	26.4%
pH	4.7	5.5
Materia orgánica	2.3% (medio)	2.9% (medio)
Nitrógeno total	0.11% (medio)	0.14% (medio)
Fósforo	1 ppm (muy bajo)	4 ppm (bajo)
Potasio	50 ppp (bajo)	100 ppm (medio)
Calcio	960 ppm (bajo)	2,160 ppm (moderadamente alto)
Magnesio	37 ppm (medio)	487 ppm (muy alto)

2.2.4 Siembra

La siembra se realizó en macetas (20 cm de diámetro y 40 cm de largo). En cada maceta se depositó tres semillas, ubicándolas en el centro de la misma, a una profundidad de 3 cm. Una vez germinadas, se seleccionó una planta por maceta, eliminando las otras. Las distancias entre plantas y filas, fueron de 20 cm y 40 cm, respectivamente.

2.2.5 Fertilización

La fórmula de fertilización aplicada fue equivalente a 140-60-60, kilogramos de N, P y K por ha. La dosis fue fraccionada en dos partes: el P, K y la mitad del N al momento de la siembra, y 20 días después de la siembra (dds) la otra mitad del N. Las fuentes utilizadas fueron: urea, superfosfato triple de calcio, y cloruro de potasio.

2.2.6 Aplicación de cal

Se realizaron en el laboratorio pruebas de titulación con hidróxido de sodio (NaOH) con el propósito de determinar las necesidades de cal, y llevar los suelos empleados, de un pH de 4.7 y 5.5 a 7.0, utilizando la metodología descrita por (Ortega, 1981). Se utilizó cal dolomítica, con un grado de pureza del 78%, a diferentes dosis para cada suelo, 2.7 t ha⁻¹ y 0.9 t ha⁻¹, para los suelos migajón-arenoso y franco, respectivamente, aplicada al momento de la siembra.

2.2.7 Riegos

Considerando los objetivos del experimento se programaron, riegos ligeros de acuerdo a las necesidades hídricas de los tratamientos. Estos se aplicaron empleando una regadera y determinando para cada suelo la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. La humedad del suelo se trato de mantener en un rango de 60 al 75% de humedad aprovechable.

2.2.8 Manejo de las muestras

Dado que en un estudio realizado por Delgado (2002), se encontró que las variables kg de materia seca (MS) y kg N absorbido a los 30 días después de la siembra, estuvieron

significativamente correlacionada ($P \leq 0.01$) y ($r=0.92$) con la materia seca total (MST), se decidió recolectar las muestras 35 días después de la siembra (dds). Se utilizaron tijeras de podar para cortar en fracciones la parte aérea de las plantas de maíz (hojas y tallo) y se acomodaron en bolsas de papel, previamente etiquetadas con el número de tratamiento y repetición correspondiente. Las raíces fueron tomadas y lavadas con agua corriente de una manguera. Posteriormente, se colocaron en bolsas de papel etiquetadas. Todas las muestras se colocaron para su secado, en una estufa de aire forzado a una temperatura de 60 °C hasta peso constante.

2.2.9 Análisis químico de las muestras

El análisis de las muestras de hojas y tallo, se realizó en el Laboratorio de Alta Tecnología de Orizaba S. C. (LATO). Los métodos y procedimientos utilizados fueron: el peso seco de hojas y tallo por gravimetría, el nitrógeno por el método Kjeldahl.

2.2.10 Variables registradas

Se determinó el peso seco de hojas (PSH) y tallo (PST) y de raíces (PSR), con el uso de una balanza granataria. El peso seco de hojas y tallo en kg MS ha⁻¹ y la absorción de N en kg N ha⁻¹ se obtuvieron mediante una transformación de los datos, al considerar una densidad poblacional de 62,500 plantas por ha, con 10% de pérdidas. La absorción de N en %, se obtuvo de resultados del laboratorio y la absorción de N en gramos por planta, al considerar el peso seco de cada planta. La eficiencia en el uso de N, estuvo definida, por la fórmula matemática: $EUN = \text{gramos de peso seco de hojas y tallo} / \text{gramos de elemento absorbido}$.

2.2.11 Análisis estadístico

Para las variables estudiadas, se realizaron análisis de varianza y pruebas de medias por el método de Tukey ($p \leq 0.05$), utilizando el programa *Statistica*. Se graficaron e interpretaron la interacciones que resultaron significativas (Gómez y Gómez, 1983). En el caso de la variable absorción de N en porcentaje, se utilizó la transformación de raíz cuadrada para los datos originales.

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Peso seco de hojas (PSH) y tallo (PST)

Al realizar el análisis de varianza, para la variable peso seco de hojas (PSH) y tallo (PST) solamente se observó diferencia estadística ($p \leq 0.01$) para el factor N, que se encuentra confundido con la interacción suelos x genotipos x cal (Cuadro 7). Para saber, cuál de los dos efectos presentó la significancia estadística, se observó la comparación de medias para N (Cuadro 8), con pesos de, 14.35 y 25.15 gramos por planta, para las dosis de 0 y 140 kg de N por ha, respectivamente.

Cuadro 7. Análisis de varianza, fuente de variación (FV) grados de libertad (GL) y cuadrados medios (CM) para las variables peso seco de hojas y tallo (PSHyT) y peso seco de raíces (PSR).

FV	GL	CM (PSHyT)	CM (PSR)
Bloques = suelos x genotipos x N x cal	3	125.37*	56.93
Suelos = genotipos x nitrógeno x cal	1	0.34	14.44
Genotipos=suelos x nitrógeno x cal	1	43.89	2.25
Nitrógeno=suelos x genotipos x cal	1	933.12**	283.81**
Suelos x genotipos= nitrógeno x cal	1	7.84	0.05
Suelos x nitrógeno= genotipos x cal	1	2.88	2.36
Genotipos x N = suelos x cal	1	0.91	87.44
Suelos x genotipos x Nitrógeno= cal	1	69.08	60.77
Error	21	650.41	41.35
Total	31	2084.64	1490.40

*.** Significativos a los niveles de Tukey $p \leq 0.05$ y 0.01 de probabilidad, respectivamente.

Al transformar los valores de (PSH) y (PST) a kg MS ha^{-1} , para las dosis 0 y 140 kg N ha^{-1} , (Cuadro 8), los valores observados fueron de 807 y 1414 muy parecidos a los obtenidos por Delgado *et al* (2004), para maíz en Venezuela, siendo de 806 y 1469 kg MS ha^{-1} , para las dosis de 0 y 120 kg N ha^{-1} a los 30 días después de la siembra. Delgado (2002) indica que las tasas de crecimiento del cultivo se incrementan al

augmentar las dosis de N, asimismo, la producción de materia seca está estrechamente relacionada con la cantidad de N absorbido, lo cual a su vez depende del N disponible.

La evidencia de mayores tasas de fotosíntesis en las condiciones de mayor absorción de N podría ser, la mayor producción de MS en los tratamientos de mayor dosis de N en comparación con los tratamientos sin fertilizar.

2.3.2 Peso seco de raíces (PSR)

En relación a la variable peso seco de raíces se encontró una diferencia altamente significativa ($p \leq 0.01$) para el factor N, con valores de 14.55 y 20.50 g para las dosis de 0 y 140 kg N ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 8).

Cuadro 8. Comparación de medias para las variables peso seco de hojas y tallo y peso seco de raíces.

Factores	Peso seco de hojas y tallo (g planta ⁻¹)	Peso seco de hojas y tallo (kg MS ha ⁻¹)	Peso seco de raíces (g planta ⁻¹)
Variedad criolla	19.65 a ¹	1105.3 a	18.20 a ¹
Híbrido	19.86 a	1117.1 a	16.85 a
Suelo migajón-arenoso	18.58 a	1045.1 a	17.79 a
Suelo franco	20.92 a	1176.7 a	17.26 a
Sin nitrógeno	14.35 b	807.2 b	14.55 b
Con nitrógeno	25.15 a	1414.7 a	20.50 a
Sin cal agrícola	19.21 a	1080.6 a	17.23 a
Con cal agrícola	21.13 a	1188.6 a	18.05 a

¹Medias con letras iguales dentro de factores, indican que no hay diferencia estadística entre los niveles (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.3.4 Absorción de nitrógeno en porcentaje (%)

El análisis de varianza para la variable absorción de N en porcentaje, no mostró diferencias estadísticas para ninguno de los factores ni sus interacciones (Cuadro 9).

Es decir, sin importar el tamaño de las plantas, se mantuvieron constantes los contenidos de N en porcentaje.

Cuadro 9. Análisis de varianza, fuente de variación (FV), grados de libertad (GL) y cuadrados medios (CM) para las variables: absorción de N (%) †, absorción de N (gramos) y eficiencia en el uso de nitrógeno (EUN).

FV	GL	CM Absorción de N (%) †	CM Absorción de N (g planta ⁻¹)	CM EUN (kg MS kg N absorbido ⁻¹)
Bloques = suelos x genotipos x N x cal	3	0.37	0.09*	643.96
Suelos = genotipos x nitrógeno x cal	1	0.08	0.004	362.67
Genotipos=suelos x nitrógeno x cal	1	0.002	0.01	25.25
Nitrógeno=suelos x genotipos x cal	1	1.15	0.5**	2554.25**
Suelos x genotipos= nitrógeno x cal	1	0.37	0.03	235.07
Suelos x nitrógeno= genotipos x cal	1	1.12	0.03	1685.93*
Genotipos x N = suelos x cal	1	0.17	0.009	274.67
Suelos x genotipos x Nitrógeno= cal	1	0.007	0.042	28.26
Error	21	6.43	0.43	9251.77
Total	31	10.48	1.34	16340.40

*.** Significativos a los niveles de Tukey $p \leq 0.05$ y 0.01 de probabilidad, respectivamente.

†Se utilizó la transformación raíz cuadrada para los datos originales.

2.3.5 Absorción de nitrógeno (g planta⁻¹)

El análisis de varianza para la variable absorción de N (g planta⁻¹) solo mostró diferencia estadística para el factor N, con valores de 0.25 y 0.50 para los niveles sin y con N (Cuadro 10). Esto debido a una estrecha relación entre el N absorbido y N disponible que ha sido documentado por Munchow (1994), quien indica que existe una relación lineal entre ambas variables.

2.3.6 Eficiencia en el uso de nitrógeno (EUN)

Para la EUN, se encontraron diferencias estadísticas, para el factor N ($p \leq 0.01$) y para la interacción suelo por N ($p \leq 0.05$), como se indica en el Cuadro 10. Las medias para la EUN fueron de 72.0 y 53.3 g MS g N absorbido⁻¹, para las dosis de 0 y 140 kg N ha⁻¹ (Cuadro 10). Estos valores están dentro de los rangos reportados por Delgado (2002), de 60 a 90 kg de MS por kg de N absorbido a los 90 días después de la siembra. Al comparar la EUN, en suelos sin y con aplicación de este elemento, se encontró una relación inversa entre la EUN y dosis de N aplicado, es decir, la EUN fue mayor en el tratamiento donde no se aplicó N. Esto se explica al considerar que bajo condiciones de estrés, las plantas tienen funciones compensatorias, asimismo el aumento en la eficiencia fisiológica es un mecanismo de adaptación de las plantas a condiciones de baja fertilidad (Retuerto y Woodward, 2003).

Cuadro 10. Comparación de medias para las variables: absorción de N en porcentaje absorción de N en gramos y eficiencia en el uso de nitrógeno (EUN).

Factores	Absorción de N (%) [†]	Absorción de N (g planta ⁻¹)	Absorción de N (kg N ha ⁻¹)	EUN (kg MS kg N absorbido ⁻¹)
Variedad criolla	1.85 a	0.38 a	21.4 a	59.6 a ¹
Híbrido	1.74 a	0.36 a	20.2 a	65.7 a
Suelo arenoso	1.79 a	0.35 a	19.7 a	63.8 a
Suelo arcilloso	1.80 a	0.39 a	30.0 a	61.5 a
Sin nitrógeno	1.60 a	0.25 b	14.1 b	72.0 a
Con nitrógeno	1.90 a	0.50 a	28.1 a	53.3 b
Sin cal agrícola	1.65 a	0.35 a	19.7 a	63.3 a
Con cal agrícola	1.68 a	0.40 a	22.5 a	65.7 a

¹Medias con letras iguales dentro de factores, indican que no hay diferencia estadística entre los niveles (Tukey, $P \leq 0.05$)

Se utilizó la transformación raíz cuadrada para los datos originales.

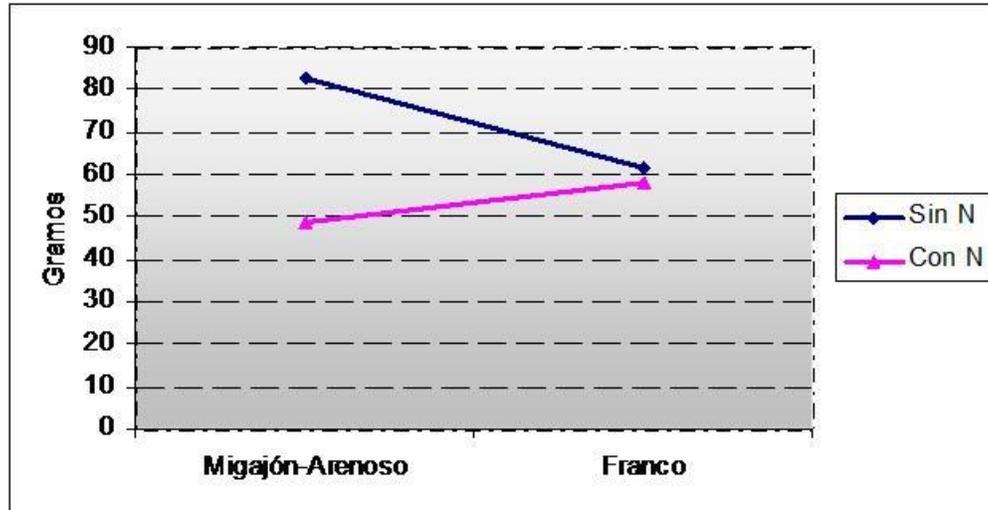


Figura 1. Comparación de medias para la interacción de los factores tipo de suelo por nitrógeno, para la variable eficiencia en el uso de nitrógeno (g de MS g de N absorbido⁻¹).

2.3.7 Interacción suelo por nitrógeno

Al estar confundidas las interacciones de primer orden, suelos x N y genotipos x cal (Cuadro 9), y dado que hay una diferencia estadística como efecto principal, para el factor N, se consideró que la interacción significativa es aquella donde participe el N, por tanto, se decidió que la interacción significativa es suelos x N. La mayor EUN se obtuvo con los tratamientos donde no se aplicó nitrógeno (Figura 1), acentuándose en el suelo migajón-arenoso. Estas diferencias se atribuyen tanto a la eficiencia en la adquisición del nutrimento por las raíces, como a la adecuada utilización de éste por la planta, asimismo por mecanismos compensatorios y se potencializa en un suelo con una mayor capacidad de intercambio catiónico, en este caso el migajón-arenoso (Fageria y Baligar 1997).

2.4 Conclusiones

Para las variables, peso seco de hojas y peso secos de raíces, solo se observaron diferencias estadísticas, a favor de la aplicación de nitrógeno. La absorción de N en porcentaje, no mostró diferencia para ninguno de los factores estudiados, ni sus

interacciones, mientras que la absorción de N, en gramos fue mayor las plantas fertilizadas. La eficiencia en el uso de N, fue mayor en las plantas no fertilizadas debido al mecanismo homeostático de adaptación que presentan todas las especies, en tanto que la interacción suelos x N, asimismo resultó significativa, por la naturaleza deficiente del suelo y la remoción natural de la planta.

2.5 Literatura citada

- Below, F. 2002. Fisiología, nutrición e abstracción nitrogenada do milho. *Informações Agronômicas* 99:7-12.
- Bertsch, F. 2005. Estudios de Absorción de nutrientes como apoyo a las recomendaciones de fertilización. *Informaciones Agronômicas* 57:1-10.
- Christiansen, N. M., C. F. Lewis. 1987. Mejoramiento de plantas en ambientes poco favorables. LIMUSA. México. pp:101-125.
- Cruz-Flores, G., D. Flores-Román, G. Alcántara-González, A. Trinidad-Santos, R. Vivanco-Delgado R. 2002. Evaluación de crecimiento del maíz y absorción de nitrógeno bajo diversas condiciones de disponibilidad del elemento en un Mollisol de Venezuela. *Agronomía Tropical* 52(1):5-22.
- Delgado R. 2002. Evaluación de crecimiento del maíz y absorción de nitrógeno bajo diversas condiciones de disponibilidad de elementos. *Agronomía Tropical*. 52 (1):5-22.
- Delgado R., M. C. Núñez, L. Velásquez. 2004. Acumulación de materia seca, absorción de Nitrógeno, Fósforo y Potasio por el maíz en diferentes condiciones de manejo de la Fertilización Nitrogenada. *Agronomía Tropical* 54(4):461-479.
- Fageria, N. K., V. C. Baligar, C. A. Jones. 1997. Growth and Mineral Nutrition on Field Crops. 2nd ed. Marcel Dekker Inc. pp:199-207.
- Gallais, A., B. Hirel. 2004. An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in corn. *Journal of Experimental Botany* (396):295-306.
- Gómez K. A., A. A. Gómez. 1983. Statistical procedures for agricultural research. 2nd edition. John Wiley and sons. Singapore. pp:230-371.
- Munchow, R. 1994. Effect of nitrogen on yield determination in irrigated corn in tropical and sub-tropical environments. *Field Crops Res* (38):1-13.

- Ortega T. E. 1981. Química de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. México. pp:34-70.
- Padrón C. E. 1996. Diseños experimentales con aplicación a la agricultura y la ganadería. Trillas. México. pp:140-180.
- Retuerto R., F. I. Woodward. 2003. Compensatory responses in growth and fecundity traits. International Journal of plants Sciences. 162:171-179.
- Stuart, P. G. 1993. Taguchi methods. Addison-Wesley Publishing Company. USA. pp:12-60.
- Zagal E. 2003. Eficiencia en el uso del nitrógeno. Agricultura Técnica. 63 (3):299-310.

CAPÍTULO III. EFECTOS PRINCIPALES E INTERACCIONES ENTRE GENOTIPOS DE MAÍZ, DOSIS DE FERTILIZACIÓN Y LOCALIDADES

PRINCIPAL EFFECTS AND INTERACTIONS AMONG CORN GENOTYPES, FERTILIZATION RATES AND LOCATIONS

Luis Carlos Alvarado Gómez¹
Catalino Jorge López Collado¹
Arturo Pérez Vázquez¹
Carlos Alberto Tinoco Alfaro²
Otto Raúl Leyva Ovalle³
Alejandro Alonso López¹

Resumen

La liberación al mercado de nuevos híbridos de maíz (*Zea mays* L.) hace necesaria su evaluación en terrenos de los productores para determinar su potencial productivo con dosis de fertilización y capacidad de adaptación en diferentes localidades. Por ello, el objetivo de este trabajo fue evaluar siete genotipos de maíz bajo dos dosis de fertilización, en dos localidades diferentes. Se establecieron experimentos en la Colonia Hidalgo y la Colonia Agrícola Michapan del municipio de Acayucan, Veracruz, durante el ciclo primavera-verano del 2007. Se utilizó un arreglo factorial 7x2x2 (siete genotipos, dos dosis de fertilización y dos localidades) bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro réplicas por tratamiento. Los genotipos evaluados fueron: 2B710, 30 F 96, 30 F 32, Singenta1, Singenta2, DK-234 y la variedad criolla "Olotillo", y las dosis 140-60-60 y 210-90-90, kg ha⁻¹ de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente. Las variables estudiadas fueron: altura de planta, diámetro de tallo, largo y ancho de la hoja de la mazorca, peso seco de planta, rendimiento de grano e índice de cosecha. El genotipo, dosis de fertilización, localidad y las interacciones explicaron el 74.4 %, 0.38 %, 16.08 % y 9.10 % del total de la suma de cuadrados. La variedad criolla "Olotillo", mostró mayores diámetros de tallo en un 10% en relación a los híbridos evaluados.

¹Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz. Km. 88.5 Carretera Xalapa-Veracruz. Apdo. Postal 421, C.P. 91700, Veracruz. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. ³Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba. Autor para correspondencia (ljorge@colpos.mx)

Respecto a localidades, en la Colonia Agrícola Michapan, las plantas tuvieron alturas y diámetros de tallo mayores que en la Colonia Hidalgo, así como mayores dimensiones en la hoja de la mazorca. La variable altura de planta, resultó significativa ($p < 0.05$) para la interacción genotipos x localidades. Para la variable largo de hoja de la mazorca, mostró interacciones significativas ($p < 0.05$) para genotipos x dosis de fertilización, genotipos x localidades y dosis de fertilización x localidades. Los híbridos superaron en un 60 % el rendimiento en grano y un 70 % el índice de cosecha a la variedad criolla "Olotillo". Para las dosis de fertilización no hubo diferencia significativa ($p < 0.05$) en rendimiento. En la Colonia Agrícola Michapan, principalmente por condiciones de suelo, se obtuvo un rendimiento promedio de $7,087 \text{ kg ha}^{-1}$ superior en casi una tonelada por hectárea respecto a la Colonia Hidalgo ($6,127 \text{ kg ha}^{-1}$).

Palabras clave: *Zea mays*, dosis de fertilización, efectos principales, genotipos, interacciones.

Abstract

With the continuous release of new hybrids of corn is needed a evaluation on land producers to determinate the productive potential and their capacity to adapt to different localities, that is why during the spring-summer cycle 2007, two experiments were established in corn-producing regions of the municipality of Acayucan, Veracruz, Hidalgo and la Colonia Agricola Michapan. We used a 7x2x2 factorial arrangement (seven genotypes, two towns and two fertilizer rates), under a complete block design with four replications. The genotypes evaluated were 2B710, 30 F 96 30 F 32, Singenta1, Singenta2, DK-234 and the native variety "Olotillo, and doses 140-60-60 and 210-90-90, kg ha⁻¹ nitrogen, phosphorus and potassium, respectively.

The variables studied were final plant height, stem diameter, length and width of the ear leaf, plant dry weight, grain yield and harvest index. The native variety "Olotillo" showed larger-diameter stem, 10 % and 5 % respectively in relation to hybrids evaluated. In la Colonia Agricola Michapan, plant heights and diameters were greater than in the colony Hidalgo, and larger in the ear leaf. For plant height was significant genotype by location interaction. For the variable leaf length of the ear, there were significant interactions, genotypes for fertilization rate, genotype by location and fertilizer rates by localities. All hybrids surpassed by 60 % grain yield and 70 % harvest index to the native variety "Olotillo. For the fertilizer there was no difference in performance. In la Colonia Agricola Michapan mainly by soil conditions, we obtained superior performance in almost a tonne of corn per hectare, compared with the colony Hidalgo.

Key words: *Zea mays*, fertilization rate, genotypes, interactions, main effects.

3.1 Introducción

El cultivo de maíz en México, cubre una superficie anual aproximada de ocho millones de hectáreas (SAGAR, 2000), de la cual el 94 % corresponde al ciclo Primavera-Verano (PV) y 6 % al ciclo de Otoño-Invierno (OI). Del total, 88 % se siembra en condiciones de temporal, con 40 % en el trópico húmedo, debido a que en esta zona la precipitación pluvial ocurre en mayor cantidad y mejor distribución, por lo que se considera una zona apropiada para el cultivo del maíz (Rodríguez, 1990).

El maíz es un producto básico en la alimentación, donde las necesidades de una población en constante aumento y la reducción de la superficie dedicada al cultivo obligan a buscar genotipos con mejor adaptación a las condiciones de cada región.

Por otro lado, uno de los insumos más importantes para elevar los rendimientos agrícolas es la fertilización. Por ello es importante conocer cuáles son las dosis más adecuadas para cada localidad y en qué proporción producen resultados óptimos para cada genotipo de maíz y tipo de suelo (Melgar y Díaz-Zorita, 1997). De hecho, los fitomejoradores han orientado sus actividades hacia la formación de híbridos que superen a los materiales criollos en rendimiento y otros atributos (González-Huerta *et al.*, 2008).

Los cultivos, como parte de los agroecosistemas, pueden ser estudiados a diferentes niveles de organización biológica, por ejemplo, a nivel de comunidad, individuo, celular o molecular. Los estudios a bajos niveles de organización son usados para descubrir mecanismos celulares o moleculares de adaptación y desarrollar criterios de selección. Estos mecanismos están relacionados de manera muy cercana a la acción génica (Hall, 2001).

La herencia puede definirse como la transmisión de características de padres a hijos a través de genes. Asimismo, el ambiente puede ser definido como la suma total de circunstancias que rodean a un organismo o a un grupo de organismos (Yan, 2002).

El genotipo de una planta define el intervalo de desempeño de la planta y está determinado por una serie de características heredables. El fenotipo producido por un genotipo en particular resulta de la interacción de las características genotípicas con el ambiente en el cual la planta está creciendo. Consecuentemente, el mismo genotipo creciendo en diferentes ambientes puede producir diferentes fenotipos. La expresión génica puede ser modificada, aumentada, reprimida, silenciada, o limitada, por mecanismos regulatorios de las células en respuesta a factores internos o externos (Rédei, 2008).

La variabilidad genética con relación al rendimiento está definida como una característica heredable de las plantas o cultivos que hace la diferencia en potenciales de producción bajo ambientes favorables o no favorables, debido a esta variabilidad genética, algunas plantas se adaptan mejor que otras bajo condiciones medioambientales específicas y estos conocimientos son considerados como una herramienta para incrementar los rendimientos de los cultivos (Fageria *et al.*, 1997).

La interacción genotipo x ambiente es frecuentemente descrita como la inconsistencia del comportamiento entre genotipos desde un ambiente a otro (Alejos *et al.*, 2006). Así Barrios-Ayala *et al.*, (2008) señalan que los resultados evidencian la interacción genotipo x manejo para el rendimiento en grano de maíz, que se manifiesta en diferentes efectos lineales, curvaturas e interacciones entre híbridos que son cambiantes y el sitio (localidades).

Las interacciones genotipo x ambiente son importantes en los estudios que involucran localidades. La identificación de genotipos de amplia o estrecha adaptación es difícil (Badu-Apraku *et al.*, 2003). Por ello es necesaria una fase de evaluación en campo para valorar características vegetativas, reproductivas, rendimiento *per se* y otros componentes asociados al rendimiento y la calidad del grano.

De manera constante son liberados híbridos con un rendimiento potencial mayor y mejor adaptación a diversos ambientes. Sin embargo, esta respuesta no es del todo cierta cuando se evalúan en campo bajo las condiciones de manejo de agricultores. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar siete genotipos de maíz (seis híbridos y una variedad criolla), dos dosis de fertilización, en dos localidades con la finalidad de determinar la adaptación de los genotipos a dosis de fertilización y localidades.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Área de estudio

Durante el ciclo primavera-verano del 2007, se establecieron dos experimentos en dos localidades: la Colonia Hidalgo (17.95 ° latitud norte y 94.92 ° de longitud oeste) a una altitud de 200 m y la Colonia Agrícola Michapan (17.92 ° latitud norte y 96.83 ° longitud oeste) a una altitud de 120 m, ambas en el municipio de Acayucan, Ver. El clima predominante en ambas localidades es Aw2, cálido húmedo con lluvias en verano; la precipitación pluvial es estacional, con un período de lluvias comprendido de junio a noviembre, una precipitación pluvial media anual de 1,500 a 1,800 mm y temperatura promedio anual de 28 °C (García, 1981).

3.2.2 Características de los suelos

Se tomaron muestras de 1 kg de suelo en las dos localidades antes del establecimiento de los experimentos, a una profundidad de 0 a 30 cm. El suelo colectado con una pala recta, se colocó en bolsas de papel previamente etiquetadas para analizarlo en el laboratorio de Suelos del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz. Las características físicas y químicas de los suelos se presentan en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Características físicas y químicas de los suelos en las dos localidades.

Característica	La Colonia Hidalgo	La Colonia Agrícola Michapan
Textura	Migajón-arenoso	Franco
Arena	76.7%	41.8%
Limo	8.0%	31.8%
Arcilla	16.3%	26.4%
pH	4.7	5.5
Materia orgánica	2.3% (medio)	2.9% (medio)
Nitrógeno total	0.11% (medio)	0.14% (medio)
Fósforo	1 ppm (muy bajo)	4 ppm (bajo)
Potasio	50 ppp (bajo)	100 ppm (medio)
Calcio	960 ppm (bajo)	2,160 ppm (moderadamente alto)
Magnesio	37 ppm (medio)	487 ppm (muy alto)

3.2.3 Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron siete genotipos de maíz: 2B710, 30 F 96, 30 F 32, Singenta1, Singenta2, DK-234 y la variedad criolla "Olotillo"; dos dosis de fertilización: 140-60-60 y 210-90-90, kg ha⁻¹ de N, P y K. Esto se realizó en las dos localidades. Se utilizó un arreglo factorial de 7x2x2 (siete genotipos, dos dosis de fertilización y dos localidades), bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones (Cuadro 12). Las unidades experimentales fueron de seis surcos de 10 m de largo, con una separación entre surcos de 0.80 m y entre bloques de un metro. La parcela útil estuvo constituida por los cuatro surcos centrales, eliminando un metro de cada extremo por efecto de bordo.

Cuadro 12. Factores y niveles bajo estudio.

Genotipos	Localidades	Dosis de fertilización (NPK)
2B710 (Dow Agrosiences)	La Colonia Hidalgo	140-60-60
30 F 96 (Pionner)	La Colonia Agrícola	210-90-90
	Michapan	
30 F 32 (Pionner)		
Singenta 1		
Singenta 2		
DK-234 (Monsanto)		
Olotillo (variedad criolla)		

3.2.4 Establecimiento de los experimentos

La preparación del terreno consistió en dos pasos de rastra cruzados. El 10 de Junio de 2007 se trazaron parcelas de 67.2 m de largo por 43 m de ancho resultando un área de 2,889 m². Para alinear las parcelas se utilizó el método del triángulo 3, 6, 9 con hilos de rafia. Asimismo se delimitaron 14 unidades experimentales en cada bloque, producto de la combinación de siete genotipos x dos dosis de fertilización NPK, esto se hizo para ambas localidades. Se hizo la selección en forma aleatoria para la asignación de los tratamientos.

3.2.5 Siembra

Se realizó los días 21 y 22 de Junio del 2007, en forma manual con espeque, a una distancia de 80 cm entre surcos y 40 cm entre matas. Se depositaron tres semillas en el surco, posteriormente se eliminó una planta para dejar solamente dos plantas por mata. Se tuvo una densidad proporcional a 62 500 plantas por hectárea.

3.2.6 Fertilización

Durante el desarrollo del cultivo se utilizaron dos dosis de fertilizante químico NPK. Las dosis fueron 140-60-60 y 210-90-90, fraccionándose en dos partes. La primera aplicación se efectuó al momento de la siembra de manera manual, a 10 cm de la planta, las cantidades aplicadas fueron de 70-60-60 y 105-90-90, en tanto que la

segunda aplicación se realizó treinta días después de la siembra y con dosis de 70 y 105 kg N ha⁻¹.

3.2.7 Control de maleza y plagas

Para aumentar la acción del rastreo sobre las arvenses, se aplicó una mezcla de glifosato y atrazinas cinco días antes de la siembra. A los 30 días después de la siembra, se aplicó un herbicida de hoja ancha para controlar el rebrote.

Una de las plagas del maíz fue gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* L.) por lo que se procedió a aplicar un insecticida cuyo ingrediente activo es clorpirifos CE, a razón de 750 ml ha⁻¹.

3.2.8 Selección de plantas

A los 20 días después de la siembra (dds), se seleccionaron 10 plantas, dentro de la parcela útil, en cada unidad experimental. Se marcaron con cintas de colores plantas representativas y con competencia completa. En estas plantas se hicieron las mediciones de las variables mencionadas.

3.2.9 Variables de estudio

En la etapa de floración se midieron: el diámetro de tallo con un vernier, la altura de planta, desde la base del tallo hasta la base de la espiga con una cinta métrica, el largo y ancho de la hoja de la mazorca con una cinta métrica.

Al momento de la cosecha, 145 (dds) las 10 plantas marcadas en cada parcela se cosecharon en forma individual y se determinó: el peso seco de planta, rendimiento en grano e índice de cosecha.

Para determinar el rendimiento de grano, las mazorcas recolectadas en cada parcela fueron desgranadas y el maíz se pesó en campo, con la ayuda de una báscula de reloj. A cada muestra de grano se le determinó la humedad, posteriormente los pesos se transformaron en rendimiento de grano en kg ha⁻¹ ajustado al 14 % de humedad. Con

los datos de rendimiento por planta y el peso seco total de planta, de las 10 plantas cosechadas individualmente, se obtuvo el índice de cosecha mediante la fórmula matemática $IC = \text{peso de grano} / \text{peso seco total de la planta}$.

3.2.10 Análisis estadístico

Para las variables estudiadas se realizaron análisis de varianza y pruebas de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) con el uso del programa de *Statistica*®. Se graficaron e interpretaron las interacciones que resultaron significativas (Gómez y Gómez, 1983).

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Etapa de floración

Las variables altura de planta y diámetro de tallo presentaron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$). Para los factores genotipos y localidades (Cuadro 13). La variedad criolla “Olotillo” es una planta de porte alto y de tallo grueso. Estas características la diferenciaron del resto de los materiales.

Se observaron plantas altas (249 cm) y tallos desarrollados (2.3 cm de diámetro) en la Colonia Agrícola Michapan (Cuadro 13) atribuido a una alta fertilidad del suelo, a la textura media y a una mayor retención de humedad comparado con el suelo migajón-arenoso de la Colonia Hidalgo.

Cuadro 13. Comparación de medias para las variables altura de planta y diámetro de tallo.

Factores	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (cm)
Genotipo		
2B710	232 ab ¹	2.0 ab
30 F 96	245 ab	2.1 a
30 F 32	239 ab	2.0 ab
Singenta 1	238 ab	2.0 ab
Singenta 2	216 b	1.9 ab
DK-234	242 ab	2.0 ab
Olotillo	258 a	2.1 a
Dosis de fertilización		
140-60-60	241 a	2.0 a
210-90-90	236 a	2.0 a
Localidad		
Colonia Hidalgo	229 b	1.8 b
Colonia Agrícola Michapan	249 a	2.3 a

¹Medias con letras iguales dentro de factores, indican que no hay diferencia estadística entre los niveles (Tukey, 0.05).

La interacción entre genotipos x localidades resultó altamente significativa ($p < 0.01$). Esto indica un comportamiento diferencial de los genotipos en función de localidades. En promedio, la altura de la planta fue menor en Colonia Hidalgo comparado con la Colonia Agrícola Michapan (Figura 2).

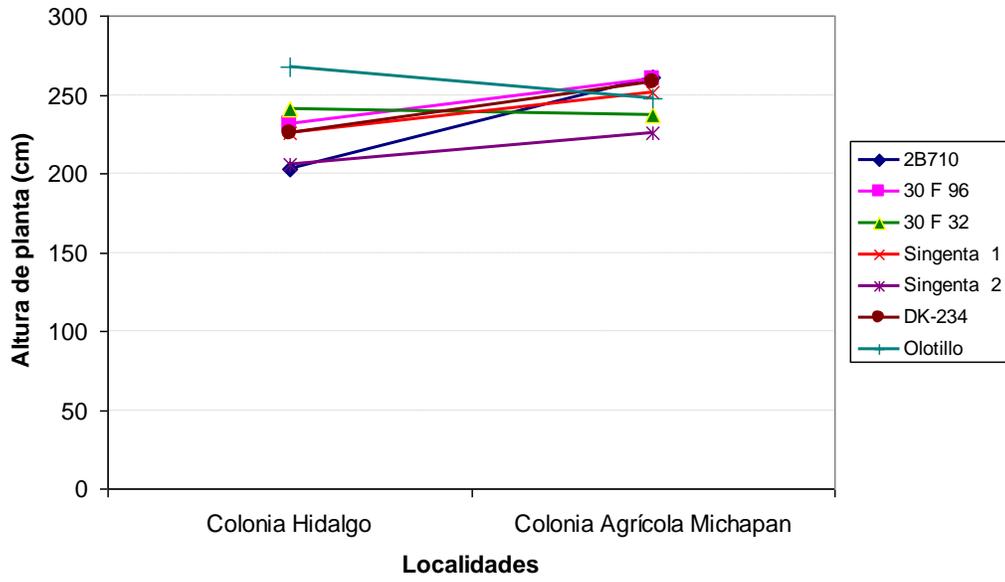


Figura 2. Comparación de medias para la variable, altura de planta, en la interacción de genotipos por localidades (LCD = 28.4).

Para las variables largo y ancho de hoja de la mazorca, se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) para los factores genotipos y localidades (Cuadro 14). Los genotipos 2 B710 y Singenta 2 mostraron los promedios más altos. De igual manera en la Colonia Agrícola Michapan, las plantas presentaron mayores valores en largo y ancho de hoja.

Cuadro 14. Comparación de medias para las variables largo y ancho de la hoja de la mazorca.

Factores	Largo de hoja (cm)	Ancho de hoja (cm)
Genotipo		
2B710	98.4 a ¹	10.1 a
30 F 96	95.9 ab	9.5 ab
30 F 32	94.7 ab	9.5 ab
Singenta 1	95.1 ab	9.4 ab
Singenta 2	92.8 b	10.3 a
DK-234	95.7 ab	9.8 a
Olotillo	96.9 ab	9.5 ab
Dosis de fertilización		
140-60-60	95.9 a	9.6 a
210-90-90	95.4 a	9.8 a
Localidad		
Colonia Hidalgo	92.2 b	9.6 b
Colonia Agrícola Michapan	99.1 a	9.9 a

¹Medias con letras iguales dentro de factores, indican que no hay diferencia estadística entre los niveles (Tukey, 0.05).

3.3.2 Interacciones

Para la variable largo de hoja de la mazorca, se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$), en las interacciones de primer orden, genotipos por dosis de fertilización, genotipos por localidades y dosis de fertilización por localidades.

En la interacción genotipos por dosis de fertilización, no se observó una tendencia definida, esto manifiesta una diferente capacidad genética para absorber y utilizar los nutrimentos, algunos investigadores suponen que, la respuesta a la fertilización NPK, tiene un control genético (Barrios-Ayala *et al.*, 2007). Para el genotipo 30 F96 el largo de hoja de la mazorca se incrementó conforme aumentó la dosis de fertilización, mientras que para el genotipo 2B710, ocurrió lo opuesto, esto debido a que la

respuesta a la fertilización es una característica propia de cada genotipo (Figura 3) (Hall, 2001).

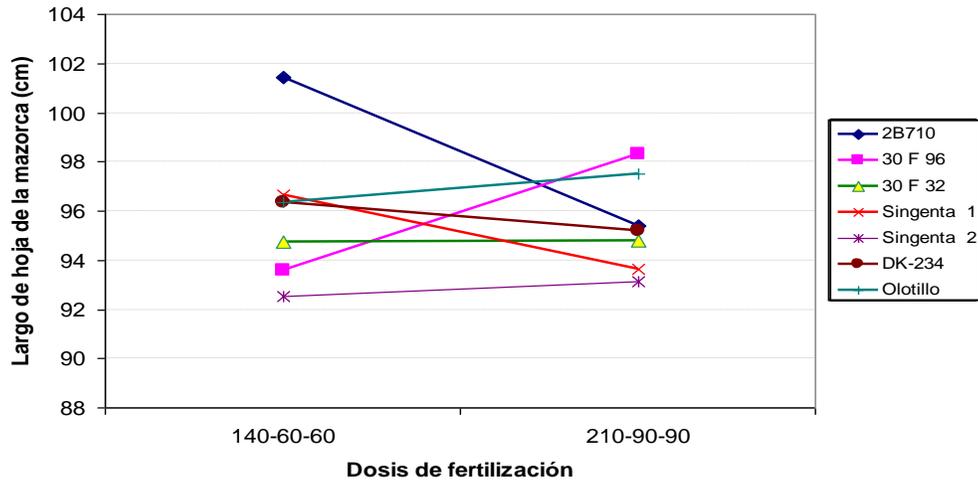


Figura 3. Comparación de medias para la variable, largo de hoja de la mazorca, en la interacción de genotipos por dosis de fertilización (LCD = 4.21).

Para la interacción genotipos por localidades, se observó una tendencia uniforme ya que todos los genotipos mostraron promedios superiores ($p < 0.05$) para la variable largo de hoja de la mazorca en la Colonia Agrícola Michapan, en comparación con la Colonia Hidalgo y (Figura 4).

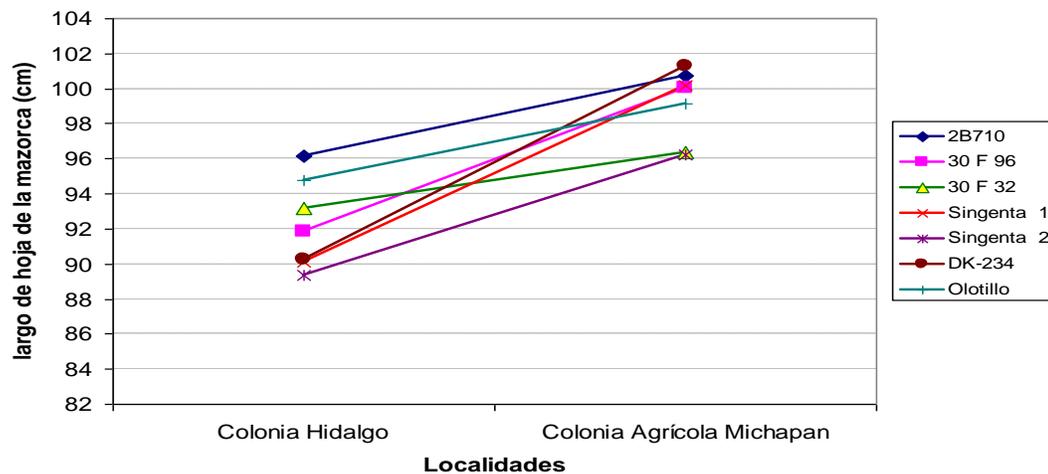


Figura 4. Comparación de medias para la variable, largo de hoja de la mazorca, en la interacción de genotipos por localidades (LCD = 8.2).

La interacción entre localidades por dosis de fertilización, mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) para la variable largo de hoja de la mazorca. Se observó que independientemente de la localidad al aumentar la dosis de fertilización a 210-90-90, se aumentó la respuesta de la variable largo de hoja, obteniéndose los mejores resultados con la dosis alta y en la Colonia Agrícola Michapan (Figura 5).

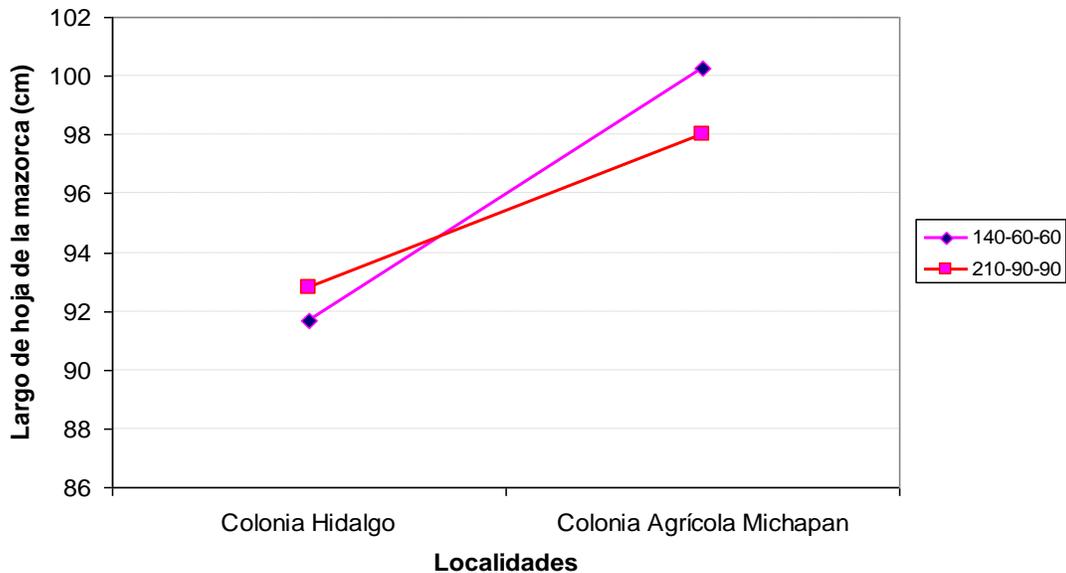


Figura 5. Comparación de medias para la variable, largo de hoja de la mazorca, en la interacción de localidades por dosis de fertilización (LCD = 5.6).

3.3.3 Etapa de cosecha

Rodríguez-Pérez *et al.* (2005) consideran que es necesario establecer ensayos en diferentes condiciones para estimar el potencial de rendimiento y la estabilidad fenotípica de variedades y proveer una guía confiable para seleccionar los mejores genotipos para nuevas localidades. Al descomponer los tratamientos en efectos principales y sus interacciones para las variables, peso seco de planta, rendimiento de grano e índice de cosecha, los resultados del análisis de varianza, mostraron una diferencia estadística altamente significativa ($p < 0.01$) en todos los casos. Todos los materiales híbridos superaron en un 50 % el rendimiento y en un 70 % el índice de cosecha respecto a la variedad criolla “Olotillo”, sin embargo este tipo de maíz produjo

el mayor peso de planta. Adicionalmente, al comparar los rendimientos de grano promedio, fueron más altos en la Colonia Agrícola Michapan, que en la Colonia Hidalgo, aunque, el peso seco de planta y el índice de cosecha, no cambiaron (Cuadro 15).

Cuadro 15. Comparación de medias para las variables peso seco de planta, rendimiento de grano e índice de cosecha.

Factores	Peso seco de planta (g)	Rendimiento de grano (kg ha ⁻¹)	Índice de cosecha
Genotipo			
2B710	384.9 ab ¹	7,393 a	43.9 a
30 F 96	420.2 ab	6,912 a	37.6 a
30 F 32	387.1 ab	6,923 a	40.8 a
Singenta 1	387.1 ab	7,207 a	42.3 a
Singenta 2	344.6 b	6,934 a	45.8 a
DK-234	394.7 ab	6,704 a	38.7 a
Olotillo	433.3 a	4,440 b	23.3 b
Dosis de fertilización			
140-60-60	397.8 a	6,127 a	38.4 a
210-90-90	386.2 a	7,087 a	33.3 a
Localidad			
Colonia Hidalgo	339.5 b	6,212 b	41.8 a
Colonia Agrícola Michapan	449.2 a	7,087 a	36.1 a

¹Medias con letras iguales dentro de factores, indican que no hay diferencia estadística entre los niveles (Tukey, 0.05).

Los resultados para el rendimiento en grano coinciden con los obtenidos por Sierra *et al.* (2002) quienes al estudiar variedades de maíz, en un análisis combinado para rendimiento de grano, encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) para

variedades, localidades y la interacción variedades por localidades. De igual manera Rodríguez-Pérez *et al.* (2005), trabajando con trigo, detectaron diferencias significativas para genotipos, ambientes y para la interacción genotipo-ambiente. La respuesta a esto se debe a que de acuerdo con Hall (2001), los mismos genotipos creciendo en ambientes diferentes pueden producir diferentes fenotipos, es decir, cuando un grupo de cultivares crecen en ambientes contrastantes el rendimiento, está determinado por los efectos genotípicos, los efectos ambientales y su interacción genotipo por ambiente.

Los datos nos indican que hay que evaluar de manera conjunta genotipos, ambientes, dosis de fertilización y localidades ya que al encontrar diferencias estadísticas se está en condiciones de dar recomendaciones técnicas sobre los genotipos que tienen un mejor desempeño en localidades específicas asimismo permite estimar el potencial productivo de acuerdo a genotipos y regiones.

Los resultados obtenidos en relación a las dosis de fertilización coinciden con los reportados por Cano *et al.* (2001) que no encontraron respuesta para rendimiento de grano en los tratamientos de fertilización, aún y cuando evaluaron cinco dosis de fertilización NPK.

Por otra parte, no coinciden con los obtenidos por Palafox-Caballero *et al.* (2005), quienes reportaron que en general, existió respuesta positiva de los genotipos a las dosis de fertilización, al evaluar seis híbridos de maíz. Esto se debe probablemente a que estudiaron un amplio rango de los niveles al considerar 24 tratamientos de fertilización química, con dosis que variaron de 0 a 160, 0 a 120 y 0 a 120 kg ha⁻¹ de N, P y K.

La interacción de segundo orden, localidad por genotipo por dosis de fertilización resultó significativa ($p < 0.05$). Esto indica que en la Colonia Agrícola Michapan, con la dosis 210-90-90 y el genotipo 2B710 de Dow se tuvieron los máximos rendimientos.

3.4 Conclusiones

Dado que existieron interacciones significativas ($p < 0.01$), para genotipos y dosis de fertilización, y genotipos y localidades, no se deben generalizar las recomendaciones de manejo en el cultivo del maíz.

Para el efecto principal genotipos la variedad criolla "Olotillo" mostró el mayor peso seco de planta y los valores más bajos en rendimiento de grano e índice de cosecha. Todos los híbridos, con rendimiento igual entre ellos, superaron en rendimiento de grano a la variedad criolla. Para dosis de fertilización no hubo respuesta en ninguna de las variables evaluadas. Para localidades el mayor rendimiento de grano lo tuvo la Colonia Agrícola Michapan con $7,087 \text{ kg ha}^{-1}$, que superó en casi 900 kg ha^{-1} a la Colonia Hidalgo.

En el caso de las interacciones hubo diferencias altamente significativa ($p < 0.01$) en la variable altura de planta para la interacción genotipos por localidades y para la variable largo de hoja de la mazorca en las interacciones, genotipos por dosis de fertilización, genotipos por localidades y localidades por dosis de fertilización.

3.5 Literatura citada

- Alejos G., P. Monasterio, R. Rea. 2006. Análisis de la Interacción Genotipo-Ambiente para rendimiento de maíz de la región maicera del estado de Yaracuy, Venezuela. *Agronomía Tropical*. 56 (3): 369-384.
- Badu-Apraku, B., F. J. Abamu, A. Menkir, A. B. Fakorede, K. Obteng-Antwi, C. The. 2003. Genotype by environment interactions in the regional early corn variety trials in west and central Africa. *Maydica* 48: 93-104.
- Barrios-Ayala, A. A. Turrent-Fernández, R. Ariza-Flores, M. Otero-Sánchez, A. Michel-Aceves. 2008. Interacción Genotipos X prácticas de manejo en el rendimiento de grano de híbridos de maíz. *Agricultura Técnica en México* 34 (1):85-90.
- Cano O., O. H. Tosquy, M. Sierra, F. A. Rodríguez. 2001. Fertilización y densidad de población en genotipos de maíz cultivados bajo condiciones de temporal. *Agronomía Mesoamericana* 12(2): 199-203.

- Hall, A. E. 2001. *Crop Responses to Environment*. CRC Press. Boca Raton, London, New York, Washington D. C. pp: 5-27.
- Fageria, N. K., V. C. Baligar, C. A. Jones. 1997. *Growth and Mineral Nutrition of Field Crops*. 2nd ed. Marcel Dekker, Inc. USA. pp: 24-102.
- García E. 1981. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. México, D. F. 3^a Ed. 252 p.
- Gómez K. A., A. A. Gómez. 1983. *Statistical Procedures for Agricultural Research*. 2nd edition. John Wiley and Sons. Singapore. pp:230-371.
- González-Huerta, A. L., M. Vázquez G., J. Sahún C., J. E. Rodríguez P. 2008. *Diversidad fenotípica de variedades e híbridos de maíz en el Valle Toluca-Atacomulco*. *Fitotecnia Mexicana*. México 31 (1):67-76.
- Melgar R. M. Díaz-Zorita. 1997. *La Fertilización de Cultivos y Pasturas*. Ed. Hemisferio Sur S. A. Buenos Aires, Argentina. pp:93-110.
- Palafox-Caballero, A., O. H. Tosquy V., M. Sierra M., A. Turrent F., A. Espinosa C. 2005. *Respuesta de híbridos de maíz normales y de alta calidad de proteína a la fertilización química*. *Terra Latinoamericana* 23(1):129-135.
- Rédei, G. P. 2008. *Encyclopedia of Genetics, Genomics, Proteomics, and Informatics*. Springer. 3rd edition Volume 1. Columbia. USA. pp:4-64.
- Rodríguez-Pérez. E., J. Sahún C., H. E. Villaseñor M., J. D. Molina G., A. Martínez G. 2005. *La interacción genotipo x ambiente en la caracterización de áreas temporales de producción de trigo*. *Agrociencia*. 39:51-64.
- Rodríguez V. J. 1990. *México y su Agricultura*. Colegio de Postgraduados. 136 p.
- SAGAR. 2000. *Centro de Estadística Agropecuaria (CEA). Avance de siembras y cosechas Primavera-Verano 2000. Resumen nacional por cultivos*.
- Sierra M., A. Palafox, O. Cano, S. Uribe, E. N. Becerra, D. Lara, S. Barrón, F. Rodríguez, J. Romero, A. Sandoval. 2002. *Comportamiento de variedades de maíz normal y con alta calidad de proteína para la región Golfo de México*. *Agronomía Mesoamericana* 14(2):135-141.
- Yan, W. 2002. *GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists and Agronomists*. CRC Press LLC. Boca Raton, London, New York, Washington D. C. pp:4-46.

CONCLUSIONES GENERALES

1. La absorción de N, P, K, Ca, y Mg, en gramos por planta, es una característica que no depende de genes, sino de condiciones de clima y suelo, las plantas absorben cantidades de todos estos elementos en función de características favorables de absorción.
2. En relación a la absorción de elementos en (%), se encontró que las concentraciones de los elementos fueron constantes independientemente del tamaño de la planta.
3. La absorción de elementos en porcentaje y la eficiencia en el uso de estos elementos, son lo mismo, ya que las mismas correlaciones entre elementos resultaron significativas.
4. Los genotipos DK-234 (híbrido) y Olotillo (criollo) absorbieron la misma cantidad de N tanto en gramos por planta como en %, asimismo, fueron igualmente eficientes en el uso del N.
5. Sin importar el tamaño de las plantas de maíz los contenidos de N en %, fueron constantes, aún en condiciones de manejo diferentes.
6. La absorción de N, en gramos por planta, fue el doble en suelos fertilizados con N, que en suelos no fertilizados con N.
7. La eficiencia en el uso de N fue más alta (25%) en suelos con bajo contenido de N, estableciéndose como un mecanismo adaptativo, de todas las plantas al bajo contenido de N.
8. La interacción genotipo x localidades, resultó significativa ($p < 0.05$) para las variables, altura de planta y largo de hoja de la mazorca.
9. la interacción genotipo x dosis de fertilización, resultó significativa ($p < 0.05$) para la variable largo de hoja de la mazorca.
10. El rendimiento en campo del DK-234 (híbrido) superó en más de 2 t ha^{-1} , al Olotillo (criollo).