



**UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA**

---

**Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias**

**Evaluación de Híbridos de Maíz  
Semi-enanos y Convencionales,  
Bajo Diferentes Dosis de Agua y  
Nitrógeno en Invernadero**

**Tesis**

**que para obtener el grado de**

**Maestro en Ciencias en**

**Biosistemática y Manejo de Recursos  
Naturales y Agrícolas**

**Presenta**

**Enrique Peña Reyes**

**Zapopan, Jalisco**

**25 de enero de 2019**



**UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA**

---

**Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias**

**Evaluación de Híbridos de Maíz  
Semi-enanos y Convencionales,  
Bajo Diferentes Dosis de Agua y  
Nitrógeno en Invernadero**

**Tesis**

**que para obtener el grado de**

**Maestro en Ciencias en  
Biosistemática y Manejo de Recursos  
Naturales y Agrícolas**

**Presenta**

**Enrique Peña Reyes**

**DIRECTOR**

**Dr. Fernando Santacruz Ruvalcaba**

**Zapopan, Jalisco**

**25 de enero de 2019**



# UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

## Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

### Evaluación de Híbridos de Maíz Semi-enanos y Convencionales, Bajo Diferentes Dosis de Agua y Nitrógeno en Invernadero

Por

**Enrique Peña Reyes**

**Maestría en Ciencias en Biosistemática y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas**

Aprobado por:

Dr. Fernando Santa Cruz Ruvalcaba  
Director de Tesis e integrante del jurado

15-ENE-2019

Fecha

Dr. Lino De la Cruz Larios  
Asesor del Comité Particular e integrante del jurado

15-Enero-2019

Fecha

Dr. Eduardo Hernández Segundo  
Asesor del Comité Particular e integrante del jurado

15-Enero-2019

Fecha

Dra. Murtha Escoto Delgadillo  
Sinodal e integrante del jurado

15/Enero/2019

Fecha

M. en C. José Rafael Gómez González  
Sinodal e integrante del jurado

15/Enero/2019

Fecha

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme finalizar una etapa más de mi proceso profesional.

A mi esposa Alejandra Godínez Salas e hijo Enrique Peña Godínez, por su amor y apoyo incondicional, por estar en cada uno de mis proyectos, por ser el motivo para continuar siempre y tratar de ser mejor cada día.

A mis padres María del Carmen Reyes Valenzuela y Enrique Peña Jiménez, por todo su amor y buenos consejos recibidos a lo largo de mi vida.

A mis hermanos Marco, Moisés y Nestor por estar a mi lado siempre y ser un ejemplo a seguir en mi vida.

A mi director de tesis, el Dr. Fernando Santacruz Ruvalcaba, por ser un profesor y tutor ejemplar, por el apoyo brindado en la licenciatura y en la maestría.

A mis asesores el Dr. Lino De La Cruz, el Dr. Eduardo Hernández, Dra. Martha Escoto y M.C. José Gómez por orientarme sobre la investigación y mi desarrollo profesional a lo largo de estos dos años.

A mis profesores de la maestría por su entrega a la enseñanza y el gran profesionalismo que demuestran en sus clases.

A mis compañeros de la maestría, por los buenos momentos que compartimos a lo largo de estos dos años, en especial a Mariela, Giovanni y Jaime.

A la empresa Monsanto-Bayer y a mis compañeros de trabajo, en especial a Esperanza Viramontes y al Dr. Manuel Oyervides.

ÍNDICE

RESUMEN .....	vii
ABSTRACT .....	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1. Mejoramiento genético en maíz .....	3
2.2. Características del maíz.....	4
2.2.1. Morfología del maíz.....	4
2.2.2. Fenología del maíz .....	4
2.3. Mejoramiento genético para reducir la altura de maíz .....	6
2.4. Características de maíces semi-enanos .....	6
2.5. Respuesta del maíz al estrés hídrico.....	8
2.5.1. Respuesta al estrés hídrico en el sistema radicular .....	9
2.5.2. Respuesta al estrés hídrico en la floración .....	9
2.6. El nitrógeno en el maíz.....	11
2.6.1. Deficiencia de nitrógeno .....	11
2.6.2. Uso eficiente del nitrógeno .....	12
3. JUSTIFICACIÓN .....	13
4. OBJETIVOS .....	14
4.1. Objetivo general .....	14
4.2. Objetivos específicos.....	14
5. HIPÓTESIS .....	15
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
6.1. Zona de estudio .....	16
6.2. Evaluación de híbridos bajo sistema hidropónico.....	17
6.2.1. Material genético .....	17
6.2.2. Preparación de experimento en un sistema hidropónico.....	17
6.3. Evaluación de híbridos en macetas con suelo .....	20
6.3.1. Material genético .....	20
6.3.2. Preparación de experimento en macetas con suelo.....	20
6.3.3. Dosis de agua .....	21
6.3.4. Dosis de nitrógeno .....	22

6.4. Diseño experimental y análisis estadístico.....	23
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
7.1. Evaluación bajo un sistema hidropónico.....	25
7.2. Evaluación en macetas con suelo.....	30
7.2.1. Dosis de agua.....	30
7.2.2. Dosis de nitrógeno.....	33
8. CONCLUSIONES.....	38
9. LITERATURA CITADA.....	39

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Etapas fenológicas del maíz.....	5
Cuadro 2. Dosis de agua para evaluación en sistema hidropónico.....	18
Cuadro 3. Dosis de nitrógeno para evaluación en sistema hidropónico .....	19
Cuadro 4. Tratamientos para evaluación en sistema hidropónico.....	19
Cuadro 5. Tratamientos dosis de agua para evaluación en macetas con suelo.....	21
Cuadro 6. Tratamientos dosis de nitrógeno para evaluación en macetas con suelo.....	22
Cuadro 7. Valores medios por tipo de germoplasma para hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LG)), peso de grano (PG) y materia seca (MS).....	25
Cuadro 8. Cuadrados medios de los componentes de varianza para hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LG)), peso de grano (PG) y materia seca (MS).....	26
Cuadro 9. Valores medios de peso de grano (PG) por germoplasma a través de dosis de agua...27	
Cuadro 10. Valores medios de peso de grano (PG) por híbrido a través de todos los tratamientos.....	27
Cuadro 11. Prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) en la fuente germoplasma, para las variables granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM) y peso de grano (PG).....	28
Cuadro 12. Prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para peso de grano (PG) en dosis de agua.....	29
Cuadro 13. Valores medios de peso de grano (PG) por germoplasma a través de dosis de nitrógeno.....	29
Cuadro 14. Valores medios por tipo de germoplasma para hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LG), peso de grano (PG) y materia seca (MS).....	30

Cuadro 15. Cuadrados medios de los componentes de varianza para hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LG)), peso de grano (PG) y materia seca (MS).....31

Cuadro 16. Prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para las variables granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de grano (LG) y peso de grano (PG).....32

Cuadro 17. Valores medios de peso de grano (PG) por germoplasma a través de los tratamientos de dosis de agua.....32

Cuadro 18. Prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para la variable peso de grano (PG) en los tratamientos de dosis de agua.....33

Cuadro 19. Valores medios por tipo de germoplasma para hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LG)), peso de grano (PG) y materia seca (MS).....34

Cuadro 20. Cuadrados medios de los componentes de varianza para hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LG)), peso de grano (PG) y materia seca (MS).....34

Cuadro 21. Prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para las variables granos por hilera (GH) y longitud de grano (LG).....35

Cuadro 22. Prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para la variable peso de grano (PG) en los tratamientos de nitrógeno.....36



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Híbridos de maíz convencionales (izquierda) y semi-enanos (derecha).....	7
Figura 2. Comparación de altura de mazorca y diámetro de tallo en plantas de maíz convencional (izquierda) y semi-enano (derecha).....	7
Figura 3. Tamaño de entrenudos de maíz convencional (arriba) y semi-enano (abajo).....	8
Figura 4. Espiga sin anteras ocasionado por estrés hídrico en floración .....	10
Figura 5. Mal llenado de grano resultado de asincronía en floración.....	10
Figura 6. Invernadero Centro Internacional de Mejoramiento Genético de Monsanto.....	16
Figura 7. Sistema de riego localizado en maceta con sustrato.....	18
Figura 8. Sistema de riego en la siembra en macetas con suelo.....	20
Figura 9. Siembra directa de semillas en macetas con suelo.....	21
Figura 10. Aplicación de fertilizante granulado en la maceta al momento de la siembra.....	23

## RESUMEN

Desde los inicios del mejoramiento genético de maíz, este se ha enfocado en desarrollar variedades con tolerancia a factores bióticos y abióticos. La introgresión de genes de enanismo, ha mejorado el arquetipo vegetal, desarrollando híbridos con gran tolerancia a acame de tallo y de raíz; aunque, se desconoce si estos híbridos presentan algún grado de tolerancia a estrés hídrico y/o aprovechan eficientemente el nitrógeno adicionado mediante las técnicas de cultivo. El objetivo principal fue evaluar el comportamiento de híbridos semi-enanos *versus* híbridos convencionales bajo diferentes dosis de agua y nitrógeno. Se evaluaron seis híbridos (3 semi-enanos y 3 convencionales) en dos ciclos de cultivo (2016 y 2017) bajo condiciones de invernadero: en el ciclo 2016, se evaluaron en un sistema hidropónico con tres dosis de nitrógeno y tres dosis de agua; en el ciclo 2017, se evaluaron en macetas con suelo, cinco dosis de agua y seis dosis de nitrógeno. En ambos casos las variables de respuesta evaluadas fueron los principales componentes de rendimiento. Al analizar los resultados en un ANVA, en el primer año se encontraron diferencias significativas en la interacción híbrido dentro germoplasma por dosis de agua, además en la interacción de germoplasma por dosis de nitrógeno; en el segundo año se encontraron diferencias significativas por tipo germoplasma y su interacción con estrés hídrico, pero no así en la interacción tipo de germoplasma por nitrógeno. Debido a que los resultados no fueron concluyentemente similares para ambos años de evaluación, es importante realizar más investigación con los materiales semi-enanos en las mismas condiciones del segundo año de evaluación. De acuerdo con los datos obtenidos en esta investigación, se puede decir que los híbridos semi-enanos son una opción viable para los programas de mejoramiento que tienen como objetivo desarrollar maíces con tolerancia a estrés hídrico y uso eficiente del nitrógeno, siendo importante la base genética que se utiliza para el desarrollo de híbridos semi-enanos.

## ABSTRACT

Since the beginning of the genetic improvement of maize, this has focused on developing varieties with tolerance to biotic and abiotic factors. The introgression of dwarf genes has improved the plant archetype, developing hybrids with great tolerance to stalk and root lodging; although, it is unknown if these hybrids present some degree of tolerance to water stress and/or efficiently use the nitrogen added through the cultivation techniques. The main objective was to evaluate the behavior of semi-dwarf hybrids *versus* conventional hybrids under different doses of water and nitrogen. Six hybrids (3 semi-dwarfs and 3 conventional) were evaluated in two growing cycles (2016 and 2017) under greenhouse conditions: in 2016, the hybrids were evaluated in hydroponic system with three doses of nitrogen and three doses of water; in 2017, the hybrids were evaluated in pots with soil, five doses of water and six doses of nitrogen. In both cases, the response variables evaluated were the main maize yield components. Analyzing the results in ANOVA, in the first-year significant differences were found in the hybrid within germplasm interaction by water dose, in addition in the germplasm interaction by nitrogen dose; in the second year, significant differences were found by germplasm type and its interaction with water dose, but not in the germplasm type interaction by nitrogen. Because the results were not conclusively similar for both years of evaluation, it is recommended to conduct more research with the semi-dwarf materials in the same conditions of the second year of evaluation. According to the data obtained in this research, it can be said that semi-dwarf hybrids are a viable option for breeding programs that aim to develop maize with tolerance to water stress and efficient use of nitrogen, being important the genetic base that is used for the development of semi-dwarf hybrids.

## 1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo más importante de México desde el punto de vista alimentario, económico y social, este grano se produce en dos ciclos agrícolas: primavera–verano y otoño–invierno, bajo distintas condiciones agroclimáticas de humedad: temporal, punta de riego y riego (Luna *et al.*, 2012). En México, el maíz se siembra en más de 7 millones de hectáreas, con una producción de 24.69 millones de toneladas. Aunque solamente el 20.9% de la superficie es bajo condiciones de riego, esta modalidad contribuye con casi el 50% de la producción nacional. El rendimiento promedio bajo riego es de alrededor de 8 t mientras que en temporal es de 2.3 t (Panorama Agroalimentario, 2016), este rendimiento en temporal se debe a las variaciones que experimenta en cantidad y distribución de la lluvia a lo largo del ciclo de cultivo (Villalobos-González *et al.*, 2016).

Condiciones ambientales como fuertes vientos, exceso de riego o lluvias prolongadas, pueden provocar acame en el maíz, las pérdidas de rendimiento debido al acame pueden llegar a ser del 5 al 25% y en algunos años del 100%. El acame de la raíz tiende a asociarse con el anclaje de la planta y la fuerza inducida por el viento sobre las secciones superiores de la planta (Bian *et al.*, 2016), es una de las principales causas de pérdida de rendimiento en el maíz debido a las dificultades que se ocasionan con la caída de las plantas al momento de realizar la cosecha mecánica (García & Watson, 2003).

En las últimas décadas, el rendimiento de maíz se ha incrementado principalmente al adoptar híbridos que presentan mayor tolerancia a alta densidad de siembra (tolerantes al acame), estrés biótico o abiótico y mayor eficiencia en el uso de recursos (Xing *et al.*, 2015). La biomasa, la resistencia al acame y la tolerancia al estrés están estrechamente relacionadas con la arquitectura de la planta de maíz, este rasgo agronómico está determinado principalmente por la altura de la planta, la altura de mazorca y el número de entrenudos. El desarrollo de cultivares con estos componentes favorables, es crucial para evitar pérdidas de rendimiento (Zhou *et al.*, 2016).

En la década de los 60s durante la llamada “Revolución Verde”, una propuesta para reducir la altura de planta fue utilizar variedades enanas en algunos cereales, como resultado de

esto, se produjeron variedades comerciales de trigo, arroz y sorgo; las cuales incrementaron el rendimiento y han sido la base de programas de mejoramiento de instituciones y empresas a lo largo de varios años (Cassani *et al.*, 2011; Xing *et al.*, 2015).

La introducción de genes de enanismo en maíz para producir híbridos no fue tan fácil, debido a sus efectos deletéreos, provocan grandes reducciones en el rendimiento de grano. Fue hasta la introducción del gen braquíptico 2 (*br2*) que aumento interés por el uso de materiales enanos en maíz, este gen provoca una reducción de los entrenudos del tallo inferior, sin una obvia reducción en otros órganos de la planta (Pilu *et al.*, 2007; Anderson & Chow, 1960).

Además del acame, la producción de maíz se ve comprometida por la escasez de agua que se agrava por el calentamiento climático y los patrones de precipitación a escala mundial (Mao *et al.*, 2015). La sequía es uno de los principales factores que provocan pérdidas en el rendimiento del maíz, a nivel mundial, se estima una pérdida media anual del 15% atribuible a la sequía y déficits hídricos (Barker *et al.*, 2005), durante periodos de sequía severa, estas pérdidas pueden ser mucho más altas y potencialmente pueden resultar en la pérdida de cosecha (Sammons *et al.*, 2015). Se espera como resultado del cambio climático, una tendencia a largo plazo hacia temperaturas más altas, una mayor evapotranspiración y una mayor incidencia de sequía en regiones específicas (Campos *et al.*, 2004), por lo que obtener altos rendimientos con menos agua es crítico para mantener la producción de maíz (Mounce *et al.*, 2016). La mayor tolerancia a la sequía se ha convertido en un rasgo prioritario en los esfuerzos actuales de mejora genética del maíz (Mao *et al.*, 2015).

La mitad de la producción mundial de alimentos aumenta directamente mediante la aplicación de fertilizantes nitrogenados (Yu *et al.*, 2015). Los híbridos de maíz desarrollados en programas de mejoramiento tienen baja eficiencia en el uso del nitrógeno, lo que obliga a los agricultores a realizar altas aplicaciones de nitrógeno por obtener buen rendimiento. El uso de N no solo aumenta los costos de los insumos, sino que también puede tener un impacto negativo en la calidad del suelo, el agua y el aire. El desarrollo de cultivares de maíz con mayor eficiencia en el uso de N sería una gran contribución para la agricultura sostenible (Eivazi & Habibi, 2013).

Se han desarrollado híbridos semi-enanos con resistencia al acame, pero se desconoce si estos son tolerantes al estrés hídrico y poseen mayor eficiencia en el uso de N.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Mejoramiento genético en maíz

El maíz fue domesticado en el sur de México a partir del teosinte hace 10,000 años aproximadamente, después se distribuyó a Norteamérica y Sudamérica adaptándose a distintos climas y tipos de suelo. Durante la expansión del cultivo de maíz, diferentes linajes de maíz adquirieron características genéticas y morfológicas específicas dando lugar a las distintas razas (Vigouroux *et al.*, 2008).

A inicio del siglo XIX en la faja maicera de Estados Unidos de América (EUA), los agricultores desarrollaron cultivares de maíz de polinización libre adaptados, aunque con ganancia en el rendimiento mínima o nula. A finales del siglo XIX y principios del siglo XX nuevos métodos de mejoramiento fueron desarrollados (selección masal, cruce de cultivares de polinización libre), aunque estos métodos no incrementaron el rendimiento. En los años 20's se desarrollaron líneas endogámicas para la producción de maíces híbridos, y en los años 30's se introdujeron híbridos a gran escala debido a los altos rendimientos obtenidos. La adopción de maíces híbridos por los agricultores comenzó primero en la zona maicera de EUA y luego en el resto de las regiones productoras de maíz del país. Entre los 60's y 80's, con el uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos y el control químico de malezas e insectos, hubo un aumento en el rendimiento del cultivo del maíz (Duvick, 2005).

En México en los años 30's, en campos experimentales de la Dirección General de Agricultura (DGA), inició la introducción de variedades de maíz; pero, fue hasta los años 40's, cuando con el financiamiento de la Fundación Rockefeller y la DGA se iniciaron programas de mejoramiento genético. Las primeras variedades mejoradas de maíz se liberaron a finales de la década. En los años 50's con el propósito de incrementar la producción agrícola, crearon varios departamentos y comités para la producción de semilla de maíz, y en los 60's por medio del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) y la Productora Nacional de Semillas (PRONASE), el gobierno se convirtió en el responsable de la producción y comercio de semillas. En los años 70's, el sector privado dedicado a la producción de semilla consigue la autorización

para realizar investigación y en los 80's se comienza con la comercialización de variedades mejoradas e híbridos de maíz (Luna *et al.*, 2012).

## 2.2. Características del maíz

### 2.2.1. Morfología del maíz

La planta de maíz es alta (1-4 m), anual y monocotiledónea, tiene un sistema radicular fibroso que sostiene un solo tallo erecto formado por nudos, entrenudos y posee abundantes hojas (puede llegar a tener hasta 30 hojas). Normalmente los cultivares de clima templado son más pequeños y desarrollan menos hojas que los tropicales (OGTR, 2008).

La planta de maíz desarrolla una o dos yemas laterales en la axila de las hojas, en la mitad superior de la planta; estas terminan en una inflorescencia femenina la cual se desarrolla en una mazorca cubierta por hojas que la envuelven; esta es la parte de la planta que almacena reservas.

La parte superior de la planta termina en una inflorescencia masculina; esta tiene una espiga central prominente y varias ramificaciones laterales con flores masculinas que producen abundantes granos de polen. Paliwal (2001) describe el desarrollo y la morfología de la planta de maíz en seis partes: plántula, sistema radicular, sistema caulinar-vegetativo, sistema caulinar-reproductivo, granos de polen y estigmas, y frutos y semillas.

### 2.2.2. Fenología del maíz

Para el entendimiento de la fisiología de cualquier cultivo es importante conocer sus etapas fenológicas. La duración de cada una de estas fases depende del genotipo, del fotoperiodo y de la temperatura (Bolaños & Edmeades, 1993). Signos macroscópicos como la antesis y microscópicos como la iniciación floral, han sido combinados por distintos autores en escalas de desarrollo, de este modo una escala señala a modo de mapa, los estadíos más relevantes del ciclo del cultivo. El hábito de crecimiento y la forma de transición al estado reproductivo tienen consecuencias importantes para la adaptación de los cultivos a estrés ambiental (Sadras *et al.*, 2002).

Ritchie & Hanway (1982) describieron el desarrollo del maíz a través de un sistema de etapas que divide el desarrollo de la planta en etapas vegetativas (V) y reproductivas (R). Es una escala en el que todas las plantas de maíz siguen el mismo esquema, pero los intervalos específicos de tiempo entre etapas y el número total de hojas desarrolladas puede variar entre distintos híbridos, estaciones, fechas de siembra y localidades. Se considera que el cultivo ha alcanzado un determinado estado cuando el 50% de las plantas se encuentra en dicho estado (Cuadro 1).

Se les llama etapas vegetativas a los estadíos previos a la floración, comienzan VE, cuando el coleóptilo emerge de la superficie del suelo, continúa V1, cuando es visible el cuello de la primera hoja, V2, V3, hasta Vn, donde n representa la última hoja antes de la etapa VT, cuando es completamente visible la última rama de la panícula, cabe señalar que esto no es lo mismo que la floración masculina, que es la liberación del polen o antesis.

Las etapas reproductivas se subdividen en 6 y se refieren principalmente al desarrollo del grano y de sus partes, inicia en R1 cuando se tienen estigmas visibles en la punta de la mazorca. Las descripciones del grano de las etapas R2 (ámpula o cuaje), R3 (grano lechoso), y R4 (grano masoso), se aplican a todos los granos de la mazorca, pero son los granos del centro, los que se deben de usar para definir una etapa. La descripción de las etapas R5 (grano dentado) y R6 (madurez fisiológica) se refiere a todos los granos de la mazorca.

Cuadro 1. Etapas fenológicas del maíz

Etapas Vegetativas	Etapas Reproductivas
VE: Emergencia	R1: Estigmas visibles (emergencia de estigmas)
V1: Primera hoja (con lígula visible)	R2: Ámpula (cuaje)
V2: Segunda hoja	R3: Leche (grano lechoso)
V(n): Enésima hoja	R4: Masa (grano masoso)
VT: Panoja masculina	R5: Dentado (grano dentado)
	R6: Madurez Fisiológica

Clasificación de las etapas fenológicas de maíz propuestas por Ritchie & Hanway (1982)



### 2.3. Mejoramiento genético para reducir la altura de maíz

En maíz, a finales de los años 50's y principio de los 60's, mejoradores, estaciones experimentales y compañías productoras de semilla de maíz, comenzaron a realizar investigación para reducir la altura de la mazorca, debido a los problemas de acame. Una propuesta para reducir la altura fue utilizar genes que causaran enanismo en la planta de maíz (Pendleton & Seif, 1961).

En maíz se han descrito más de 40 tipos de enanismo; sin embargo, sus efectos deletéreos provocan grandes reducciones en el rendimiento de grano, por lo que no han sido utilizados para mejorar el rendimiento del cultivo en germoplasma que es sensible al acame (Pilu *et al.*, 2007).

Existen tres genes braquítico (*br1*, *br2* y *br3*) que confieren baja estatura, debido a un acortamiento en los entrenudos del tallo (Cassani *et al.*, 2011). La reducción en el tamaño de estas variedades es causada por la anormal respuesta de las giberelinas, lo que sugiere que controla la estatura de la planta. Sin embargo, la elongación de órganos en una planta es complejo y este fenómeno es regulado por muchas hormonas vegetales incluyendo auxinas y brasinoesteroides, además de las giberelinas (Vogler & Kuhlemeier 2003).

El gen braquítico que tiene el mayor potencial agronómico, es el *br2*, este provoca una reducción de los entrenudos del tallo inferior, sin una obvia reducción en otros órganos de la planta (Pilu *et al.*, 2007).

### 2.4. Características de maíces semi-enanos

La altura de los semi-enanos es de aproximadamente dos tercios de los híbridos normales (Figura 1), altura de mazorca menor y tallo con mayor diámetro que les confiere una mayor resistencia al acame, como se puede apreciar en la Figura 2 (Anderson & Chow, 1960).



Figura 1. Híbridos de maíz convencionales (izquierda) y semi-enanos (derecha)



Figura 2. Comparación de altura de mazorca y diámetro de tallo en plantas de maíz convencional (izquierda) y semi-enano (derecha)

El número de nudos es similar entre convencionales y semi-enanos, aunque los entrenudos de los semi-enanos son más cortos (Figura 3). Las hojas son muy similares, pero los semi-enanos tienen hojas que son más erectas y más oscuras, las hojas persisten durante más tiempo en un estado verde activo y a medida que se acerca a la madurez esta diferencia se hace más pronunciada, este fenotipo es conocido como “Stay Green” (Cassani *et al.*, 2011). Esta mayor persistencia puede representar un menor requerimiento de nitrógeno, una mayor tolerancia a la luz reducida, o una madurez relativa más larga inconscientemente seleccionada durante el proceso limitado de retrocruzamiento y autopolinización (Anderson & Chow, 1960).



Figura 3. Tamaño de entrenudos de maíz convencional (arriba) y semi-enano (abajo)

No presenta diferencias en la longitud de la mazorca y dependiendo de las líneas progenitoras pueden mostrar una disminución en número de hileras de granos por mazorca, aunque sin una disminución en total de granos por mazorca. No presenta diferencias en cuanto al llenado de grano (Anderson & Chow, 1960).

### 2.5. Respuesta del maíz al estrés hídrico

El maíz tiene una amplia base genética para tolerancia al estrés abiótico, la cual es reflejada por su habilidad para crecer en diferentes ambientes, a pesar de que es esencialmente un cultivo de clima cálido y humedad moderada. El mejoramiento genético en el rendimiento de maíz a través de los pasados 70 años es el resultado de cambios fisiológicos (OGTR, 2008).

El maíz es una planta C4 con una alta tasa de actividad fotosintética, tiene el más alto potencial para la producción de carbohidratos por unidad de superficie por día y fue el primer cereal sometido a rápidas e importantes transformaciones tecnológicas en su forma de cultivo; sus características fisiológicas pueden ser manipuladas por medio del manejo del cultivo y por la selección de cultivares adaptados (Lafitte, 2001).

Las condiciones de estrés hídrico inducen en las plantas respuestas que afectan su morfología, fisiología y metabolismo (Rosabal *et al.*, 2014). El estrés hídrico en maíz inhibe la fotosíntesis y disminuye el flujo de fotosintatos a los órganos en desarrollo (Avendaño-Arrazate *et al.*, 2008).

#### 2.5.1. Respuesta al estrés hídrico en el sistema radicular

La respuesta al estrés hídrico en raíces del maíz es regulada por el ajuste osmótico en las puntas de las raíces del maíz, que puede resultar de dos mecanismos generales: aumento en la tasa neta de deposición osmótica o una disminución en la tasa de expansión tisular. Las hexosas son el principal contribuyente al ajuste osmótico en la región basal de la zona de crecimiento y la prolina en el ápice de las raíces con estrés hídrico, que contribuye hasta el 50% del ajuste osmótico (Sharp *et al.*, 2004).

Pero el ajuste osmótico en la punta de la raíz primaria es insuficiente para mantener la turgencia a en las raíces que crecen bajo déficit hídrico severo, es por ello que existen proteínas que desempeñan un papel clave en el control de la extensión de la pared celular en respuesta al estrés hídrico, tales como: expansinas y la xiloglucano endotransglicosilasa (XET) (Sharp *et al.*, 2004).

#### 2.5.2. Respuesta al estrés hídrico en la floración

Se considera que la floración y las etapas iniciales del período de llenado de grano en el maíz son las etapas más críticas para la determinación del rendimiento de grano. Los síntomas más importantes del daño por sequía durante la floración son los siguientes: retraso en el desarrollo de la inflorescencia, espigas sin anteras (Figura 4), asincronía en floración (Figura 5),

reducción de la fertilidad del polen y viabilidad, reducción de la receptividad del pistilo (Avendaño-Arrazate *et al.*, 2008; Campos *et al.*, 2004; Nemali *et al.*, 20015)



Figura 4. Espiga sin anteras ocasionado por estrés hídrico en floración



Figura 5. Mal llenado de grano resultado de asincronía en floración

El flujo constante de fotoasimilados tiene un rol importante en el desarrollo del óvulo y la semilla. La interrupción de este flujo debido a la deshidratación causa una reducción en las actividades clave de las enzimas metabólicas del carbono. Algunos estudios sugieren que los efectos del déficit de agua pueden influenciar la actividad de la invertasa ácida y causar una reducción parcial del flujo adecuado de fotoasimilados para el crecimiento de la semilla en desarrollo. El efecto de la invertasa ácida tiene un rol central suministrando los azúcares

necesarios para el desarrollo de la semilla. Los resultados sugieren que el aumento de la actividad de la invertasa ácida es importante para continuar con el desarrollo de los ovarios justo antes de la polinización y de los granos después de la polinización (Bruce *et al.*, 2002).

## 2.6.El nitrógeno en el maíz

La mitad de la producción mundial de alimentos aumenta directamente mediante la aplicación de fertilizantes nitrogenados (Yu *et al.*, 2015). En maíz, el nitrógeno tiene un papel muy importante en el desarrollo del cultivo, es uno de los principales insumos en los sistemas con alto potencial de producción.

El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados ha causado un impacto perjudicial sobre la diversidad y el funcionamiento de los ecosistemas bacterianos, animales y vegetales no agrícolas. Se ha demostrado que, implementando las mejores prácticas de manejo de N, junto con la mejora genética de cultivos para cada país, se puede reducir sustancialmente el exceso de aplicaciones de fertilizantes nitrogenados sin comprometer los rendimientos de los cultivos (Simons *et al.*, 2014).

### 2.6.1. Deficiencia de nitrógeno

La planta de maíz usa 13 minerales diferentes, pero nada más tres de ellos son necesarios en cantidades relativamente altas: nitrógeno, fósforo y potasio. La carencia de estos nutrientes puede reducir la producción en 10-30% antes de que aparezcan síntomas claros de carencia en el campo (Lafitte, 1993).

El nitrógeno aumenta el contenido de protoplasma, por lo tanto, aumenta el tamaño de las células, el área foliar y la actividad fotosintética; además, mejora positivamente el rendimiento de grano en el maíz (Eivazi & Habibi, 2013).

El estrés por deficiencia de nitrógeno en el maíz afecta diversos factores que influyen en el rendimiento, dependiendo del momento en que este afecta las partes vegetales en crecimiento.



La carencia de nitrógeno antes de la etapa V6 genera plantas amarillas y pálidas con hojas pequeñas y crecimiento lento (Lafitte, 1993). Cuando se presenta antes de la floración, el estrés por deficiencia de N reduce el desarrollo del área foliar, la tasa fotosintética y el número de espiguillas en la mazorca. Cuando ocurre durante la floración, provoca el aborto de granos y mazorcas, en tanto que, si surge durante el llenado de granos, acelera la senescencia foliar, y reduce la fotosíntesis y el peso de los granos (Bänziger *et al.*, 2012).

### 2.6.2. Uso eficiente del nitrógeno

Más de la mitad del N aplicado no es absorbido por las plantas de maíz y es vulnerable a las pérdidas por volatilización, desnitrificación y lixiviación; que contaminan el aire y agua (Saengwilai *et al.*, 2014), si a esto le sumamos el uso prolongado y excesivo de fertilizantes nitrogenados, los efectos en el medio ambiente podrían ser mayores.

La eficiencia del uso de nutrientes en la agronomía se puede definir como la relación entre el rendimiento y la cantidad de nutrientes consumidos (Eivazi & Habibi, 2013). El uso eficiente de N en la producción de maíz es importante para aumentar el rendimiento de grano y con esto poder maximizar el rendimiento económico (Eivazi & Habibi, 2013), a su vez, reduciendo el impacto al medio ambiente. Por tal motivo, el aumento de la eficiencia del uso de nitrógeno (NUE, por sus siglas en inglés) ha sido un foco importante de investigaciones agrícolas y ambientales recientes (Yu *et al.*, 2015).

La selección de los rasgos de la raíz que mejoran la exploración rápida y profunda del suelo podría usarse como una estrategia para mejorar la eficiencia de la cosecha N (Saengwilai *et al.*, 2014).

En países en desarrollo, la disponibilidad subóptima de nitrógeno es una limitación para el rendimiento de los cultivos. Los cultivares con una mayor adquisición de N en suelos con bajo contenido, podrían ayudar a amortiguar la producción alimentaria, así como a reducir la degradación ambiental, debido al uso excesivo de fertilizantes (Saengwilai *et al.*, 2014).

### 3. JUSTIFICACIÓN

Desde hace algunas décadas, los programas de mejoramiento genético de maíz se han enfocado en reducir la altura de planta para evitar la pérdida de rendimiento ocasionada por el acame, una solución a este problema fue utilizar variedades enanas.

Otra iniciativa global de mejoramiento genético de maíz ha sido el desarrollo de materiales tolerantes al estrés hídrico para tener mejores rendimientos y estabilizar la producción mundial; además, del desarrollo de materiales con uso eficiente del nitrógeno para reducir la aplicación de fertilizantes nitrogenados y reducir el impacto que genera al medio ambiente.

Es importante hacer selección de germoplasma que muestre alta eficiencia en el uso del agua y nutrientes, para maximizar el rendimiento, y que este no sea dependiente de buenas prácticas agrícolas y las condiciones ambientales.

Aunque los híbridos semi-enanos han demostrado mayor tolerancia al acame, se desconoce si estos materiales son tolerantes al estrés hídrico o si poseen mayor eficiencia en el uso de nitrógeno.



## 4. OBJETIVOS

### 4.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento de híbridos de maíz semi-enanos y convencionales en diferentes dosis de agua y nitrógeno.

### 4.2. Objetivos específicos

- Identificar la respuesta de los híbridos semi-enanos a diferentes dosis de agua en distintas etapas fenológicas.
- Determinar el tipo de germoplasma (semi-enano/convencional) que es más eficiente en el uso del nitrógeno.

## 5. HIPÓTESIS

Los híbridos de maíz semi-enanos poseen mayor tolerancia a las condiciones de estrés hídrico y mayor eficiencia en el uso del nitrógeno en comparación con los híbridos convencionales.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron 2 experimentos con híbridos semi-enanos (HS) e híbridos convencionales (HC) con diferentes dosis de agua y nitrógeno en invernadero. El primer experimento fue en el invierno del 2016 bajo un sistema hidropónico (sustrato) y el segundo en el invierno del 2017 en macetas con suelo. Algunos híbridos no se evaluaron en ambos años debido a la disponibilidad de la semilla.

### 6.1.Zona de estudio

El trabajo se llevó a cabo en un invernadero ubicado en el Centro Internacional de Mejoramiento Genético de Monsanto (CIMGM), Km 7 Carretera a San Miguel Cuyutlán. Municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México. Latitud 20°25'44.256''N, Longitud 103°23'41.351''O. El área tiene un clima semicálido semihúmedo, tiene una temperatura máxima promedio 30.6 °C y mínima 7.9 °C, media anual 19.8 °C, con una precipitación media anual 928 mm. Se encuentra a 1579 msnm y tiene un tipo de suelo feozem háplico.

El invernadero es del tipo gótico con área total de 3,360 m<sup>2</sup>, 2 naves principales, cenitales y cortinas laterales automatizadas en cada nave (Figura 6), además, cuenta con un sistema de riego localizado sensores para el control de temperatura y humedad.



Figura 6. Invernadero Centro Internacional de Mejoramiento Genético de Monsanto

## 6.2. Evaluación de híbridos bajo sistema hidropónico

Este experimento se estableció en el invierno de 2016, en un sistema hidropónico, con el propósito de medir las cantidades exactas de agua y nitrógeno suministradas, además, de que no hubiera interacción con el sustrato y la solución nutritiva.

### 6.2.1. Material genético

El germoplasma evaluado en este experimento consistió en 6 híbridos de la empresa Monsanto®, de los cuales 3 híbridos fueron semi-enanos (EXP1, EXP2 y EXP3) y 3 híbridos convencionales (DK4050, GARAÑON y CARIBU). Todos los híbridos semi-enanos se encuentran en etapa experimental (no comercial). Los híbridos convencionales son materiales comerciales, líderes en ventas en el estado de Sinaloa, México.

### 6.2.2. Preparación de experimento en un sistema hidropónico

Los híbridos se sembraron en charolas de germinación, a los 7 días se trasplantaron 6 plántulas por repetición/ híbrido/ tratamiento en macetas de plástico (10 L de capacidad) con sustrato No. 6 de la marca Floraplant.

De acuerdo a las especificaciones del sustrato, este posee buena estructura y retención de humedad, porosidad óptima, nutrientes de lenta liberación, CE de 1.5 – 2.0 dS/m y pH 5.8 – 6.5; está compuesto de fibra de coco, musgo en descomposición, tepojal cribado, tezontle rojo y osmocote (14-14-14).

Para suministrar el agua, se utilizó un sistema de riego localizado (Figura 7), el agua utilizada para riego tiene pH 7.5 y una conductividad eléctrica de 0.19 dS/m.



Figura 7. Sistema de riego localizado en maceta con sustrato

Al no producirse de manera comercial el maíz en hidroponía, no se ha reportado una solución nutritiva y dosis de riego óptimas.

Para el suministro de agua se fijó como dosis media 400 mL de agua/planta/día, dosis utilizada en los últimos 2 años dentro del invernadero en el CIMGM, para establecer las dosis de agua alta y baja, se sumaron y restaron 100 mL respectivamente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Dosis de agua para evaluación en sistema hidropónico

Nombre	Nomenclatura	mL de agua (planta/día)
Dosis Baja de Agua	DBA	300
Dosis Media de Agua	DMA	400
Dosis Alta de Agua	DAA	500

Nomenclatura para dosis de agua

Para las dosis de nitrógeno se utilizó como dosis media, la dosis utilizada en el CIMGM de 175 ppm, para las dosis baja y alta, se restaron y sumaron 50 ppm de nitrógeno, quedando 125 y 225 ppm de N respectivamente (Cuadro 3). Las fuentes de nitrógeno para proporcionar las

partes por millón fueron: nitrato de calcio  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , nitrato de magnesio  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ , fosfato monoamónico  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ .

Cuadro 3. Dosis de nitrógeno para evaluación en sistema hidropónico

Nombre	Nomenclatura	ppm de nitrógeno
Dosis Baja de Nitrógeno	DBN	125
Dosis Media de Nitrógeno	DMN	175
Dosis Alta de Nitrógeno	DAN	225

Nomenclatura para dosis nitrógeno

Derivado de la interacción de las tres dosis de nitrógeno (ppm) y tres dosis de agua (mL), se hicieron los 9 tratamientos descritos en el cuadro 4, quedando un diseño factorial de 3 por 3.

Cuadro 4. Tratamientos para evaluación en sistema hidropónico

No.	Tratamiento	mL de agua (planta/día)	ppm de nitrógeno
1	DBA + DBN	300	125
2	DMA + DBN	400	125
3	DAA + DBN	500	125
4	DBA + DMN	300	175
5	DMA + DMN	400	175
6	DAA + DMN	500	175
7	DBA + DAN	300	225
8	DMA + DAN	400	225
9	DAA + DAN	500	225

Tratamientos resultados de las combinaciones de 3 dosis de agua por 3 dosis de nitrógeno, DBA=Dosis Baja de Agua, DMA=Dosis Media de Agua, DAA=Dosis Alta de Agua, DBN=Dosis Baja de Nitrógeno, DMN=Dosis Media de Nitrógeno y DAN=Dosis Alta de Nitrógeno

### 6.3. Evaluación de híbridos en macetas con suelo

Este experimento se estableció en el invierno de 2017, dado que se pretendía hacer una evaluación más parecida a la siembra de los híbridos en campo, se sembraron en macetas con suelo recolectado en el CIMGM.

#### 6.3.1. Material genético

El germoplasma evaluado en este experimento consistió en 6 híbridos de la empresa Monsanto®: 3 híbridos semi-enanos (EXP4, EXP5 y EXP6) y 3 híbridos convencionales (DK4050, GARAÑON y ARMADILLO). Los híbridos semi-enanos se encuentran en fase experimental (no comercial). Todos los híbridos convencionales son materiales comerciales, líderes en ventas en el estado de Sinaloa, México.

#### 6.3.2. Preparación de experimento en macetas con suelo

Los híbridos se sembraron en macetas de plástico de 10 L de capacidad con suelo del sitio (feozem háplico) en un sistema de riego localizado con dos goteros por maceta e identificación de cada híbrido (Figura 8). Se sembraron directamente dos semillas en cada maceta y en la etapa V1 se raleo a una sola planta, para asegurar el establecimiento de los híbridos (Figura 9).

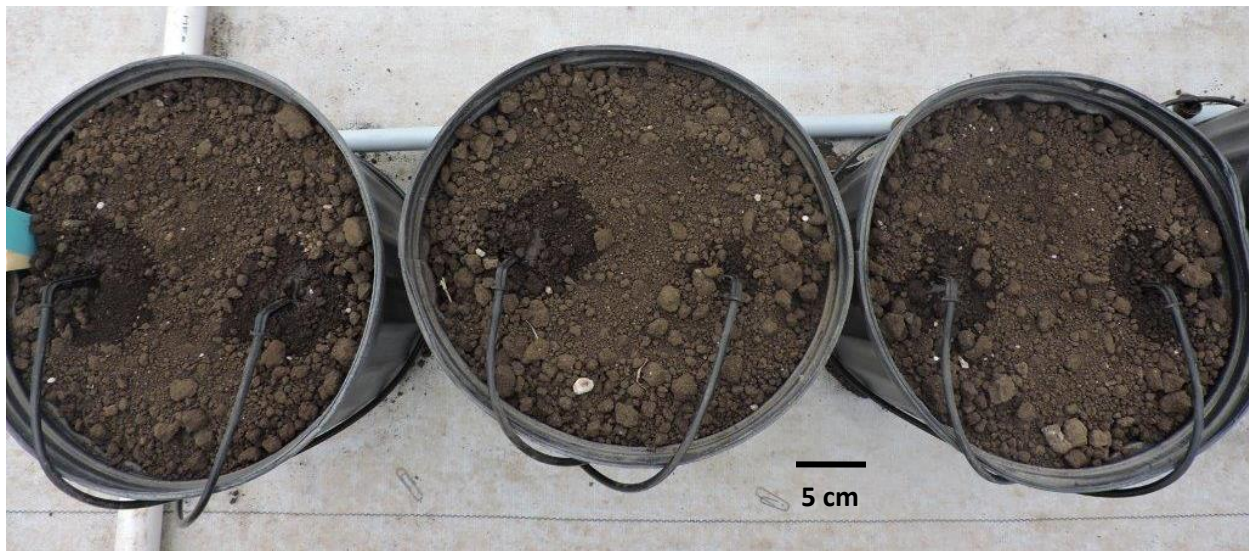


Figura 8. Sistema de riego en la siembra en macetas con suelo





Figura 9. Siembra directa de semillas en macetas con suelo

### 6.3.3. Dosis de agua

Los híbridos se evaluaron en cuatro tratamientos de dosis de agua, aplicando únicamente 300 mL/planta/día de agua para inducir estrés durante las siguientes etapas fenológicas VE-R6, V6-VT, R1-R3, R4-R6 y un tratamiento control, el cual se mantuvo a capacidad de campo durante todo el ciclo del cultivo. Se utilizó una fertilización para todos los tratamientos de 300 unidades de nitrógeno, 100 unidades de fósforo y 100 unidades de potasio por maceta.

Cuadro 5. Tratamientos dosis de agua para evaluación en macetas con suelo

No.	Etapas fenológicas Tratamiento	Suministro de agua (mL/día)			
		VE - V6	V6 - VT	R1 - R3	R4 - R6
1	Control	CC	CC	CC	CC
2	VE-R6	300	300	300	300
3	V6-VT	CC	300	CC	CC
4	R1-R3	CC	CC	300	CC
5	R4-R6	CC	CC	CC	300

Tratamientos con diferentes dosis de agua en distintas etapas vegetativas y reproductivas, CC=Riego a Capacidad de campo, VE=Emergencia, V6= 6 hojas, VT= Panoja masculina, R1=Emergencia de estigmas, R3=Grano lechoso, R4=Grano masoso, R6=Madurez Fisiológica



## 6.3.4. Dosis de nitrógeno

Además, fueron evaluados bajo diferentes dosis de nitrógeno, se siguió como dosis estándar la de 300 unidades de nitrógeno (UN) en dos aplicaciones (como se utiliza en el estado de Sinaloa), y se propuso utilizar una dosis más alta y una más baja con aplicaciones en diferentes etapas fenológicas del maíz. Los tratamientos para dosis de nitrógeno quedaron de la siguiente manera: 0 (sin aplicación de N), 150 UN en dos aplicaciones, 300 UN en dos aplicaciones, 300 UN en tres aplicaciones, 450 UN en dos aplicaciones y 450 UN en cuatro aplicaciones, quedando los tratamientos como se muestra en el Cuadro 6. La primera aplicación de nitrógeno se hizo con urea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ) y fosfato diamónico ( $\text{H}_9\text{N}_2\text{O}_4\text{P}$ ) por maceta a 8 cm de la planta (Figura 10), el aporte de las unidades nitrógeno en las siguientes etapas fenológicas se hizo solo con urea. Se aplicaron 100 unidades de fósforo y 100 unidades de potasio al momento de la siembra y se mantuvo el suministro de agua a capacidad de campo durante todo el ciclo de cultivo en todos los tratamientos.

Cuadro 6. Tratamientos dosis de nitrógeno para evaluación en macetas con suelo

Etapas fenológicas y Dosis de Nitrógeno		Unidades de Nitrógeno (UN)				Fertilización total		
No.	Tratamiento	Siembra	V6	R1	R4	N	P	K
1	0 UN	0	0	0	0	0	100	100
2	150 UN (2 aplicaciones)	100	50	0	0	150	100	100
3	300 UN (2 aplicaciones)	100	200	0	0	300	100	100
4	300 UN (3 aplicaciones)	100	100	100	0	300	100	100
5	450 UN (2 aplicaciones)	100	350	0	0	450	100	100
6	450 UN (4 aplicaciones)	100	200	75	75	450	100	100

Tratamientos bajo diferentes dosis de nitrógeno y número de aplicaciones, UN=Unidades de nitrógeno, V6= 6 hojas,

R1=Emergencia de estigmas, R4=Grano masoso



Figura 10. Aplicación de fertilizante granulado en la maceta al momento de la siembra

#### 6.4. Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental utilizado en el primer ciclo de evaluación (hidroponía) fue parcelas subdivididas con tres repeticiones por híbrido, anidados dentro de tipo de germoplasma (semi-enanos y convencionales), en nueve tratamientos resultados de 3 dosis de riego por 3 dosis de nitrógeno. El diseño se establece primero con la separación del tipo de germoplasma debido a la diferencia en la altura de las plantas y el efecto que este puede causar al establecerlas juntas (efecto sombreo).

El segundo ciclo de evaluación (macetas con suelo) se establecieron dos experimentos: el primero con cinco tratamientos de dosis de agua y el segundo con seis tratamientos de nitrógeno, ambos bajo un diseño experimental de parcelas divididas, con tres repeticiones anidado dentro de tipo de germoplasma (semi-enanos y convencionales). Al igual que en el primer año se establece por tipo de germoplasma debido a la diferencia en la altura de las plantas.

En ambos ciclos de cultivo, una vez alcanzada la madurez fisiológica del cultivo, se cosecharon todas las mazorcas por parcela y se llevaron a secar con flujo constante de aire a 34°C hasta que alcanzaron una humedad de 12%. Luego de secado se llevaron a laboratorio

donde fueron tomadas las variables de respuesta (componentes de rendimiento) por mazorca: hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LG), peso de grano (PG) y materia seca (MS).

La toma de datos de las variables HM, GH y GM, se realizó contando manualmente; para LM, DM y LG se utilizó un vernier; para tomar PG, se desgranaron las mazorcas manualmente y se pesaron en una balanza analítica; para tomar MS se pesó la biomasa aérea (tallos y hojas) de cada planta. Además, para calcular el índice de cosecha (IC), se utilizó la fórmula  $IC = \text{Rendimiento de grano} / \text{Biomasa aérea}$ , empleada por Rincón-Tuexi *et al.* (2006), donde  $IC = PG / PG + MS$ . Luego de la captura de datos se hizo la revisión para tener una uniformidad en los datos. Se realizó un análisis de varianza (ANVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para los tratamientos de dosis de agua y nitrógeno. Los análisis estadísticos fueron realizados mediante el sistema de análisis estadístico SAS (Statistical Analysis System).

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Evaluación bajo un sistema hidropónico

Los materiales semi-enanos a través de los tratamientos del primer ciclo de evaluación en hidroponía tuvieron medias mayores en comparación con los convencionales para las variables GH, GM, LM y PG, mientras que los convencionales tuvieron los valores mayores en HM, DM, LG y MS (Cuadro 7). Siendo PG la variable más importante, ya que es el componente principal del rendimiento en maíz.

Cuadro 7. Valores medios por tipo de germoplasma para hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LG), peso de grano (PG) y materia seca (MS)

Germoplasma	HM	GH	GM	LM	DM	LG	PG	MS
Semi-enano	16.735	26.167	435.636	12.360	4.532	1.050	0.099	0.094
Convencional	16.920	23.938	404.722	11.733	4.541	1.084	0.094	0.106

Valores de HM en número de hileras por mazorca, GH en número granos por hilera, GM en número de granos por mazorca, LM, DM y LG en cm, valores de PG y MS en kg/planta

El análisis de varianza encontró diferencias significativas (Cuadro 8) en los componentes: germoplasma, para las variables GH, GM, LM, LG, PG y MS; híbrido dentro de germoplasma para todas las variables; dosis de agua para GH, GM, LM, DM, LG, PG y MS; germoplasma por dosis de agua para LM y MS; dosis de agua por híbrido dentro de germoplasma, para GH, PG y MS; dosis de nitrógeno para HM, DM y LM; germoplasma por dosis de nitrógeno para las variables GH, GM y PG; en dosis de agua por dosis de nitrógeno para las variables DM, LG y MS; en la fuente dosis de agua por dosis de nitrógeno por híbrido dentro de germoplasma para la variable LG.

Cuadro 8. Cuadrados medios de los componentes de varianza para hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LG)), peso de grano (PG) y materia seca (MS)

	HM	GH	GM	LM	DM	LG	PG	MS
Germoplasma	1.338	201.112***	38703.802***	15.904***	0.002	0.047**	0.00086**	0.00567***
Híbrido (Germoplasma)	33.197***	157.756***	33527.927***	14.373***	2.018***	0.136***	0.00270***	0.00240***
Dosis de Agua	2.302	489.547***	168510.043***	56.703***	3.977***	0.345***	0.03170***	0.06600***
Germoplasma x Dosis de Agua	0.666	4.427	302.821	2.215*	0.032	0.008	0.00004	0.00160***
Dosis de Agua x Híbrido (Germoplasma)	1.477	14.165**	3355.376	1.043	0.038	0.003	0.00015234*	0.00043**
Dosis de Nitrógeno	4.316**	2.319	4033.436	2.048	0.114**	0.040***	0.00007227	0.00022
Germoplasma x Dosis de Nitrógeno	1.587	33.333**	9462.742**	0.79	0.042	0.004	0.00074***	0.00001
Dosis de Nitrógeno x Híbrido (Germoplasma)	0.389	3.728	1847.929	0.283	0.013	0.003	0.00007	0.00013
Dosis de Agua x Dosis de Nitrógeno	1.091	5.626	2650.677	0.385	0.053*	0.025***	0.00003	0.00044*
Germoplasma x Dosis de Agua x Dosis de Nitrógeno	0.216	3.634	1252.746	1.27	0.009	0.005	0.00008	0.00002
Dosis de Agua x Dosis Nitrógeno x Híbrido (Germoplasma)	1.419	2.518	1018.035	0.34	0.018	0.008*	0.00008	0.00012

\*Significativo con un valor de  $P < 0.05$ , \*\* Significativo con un valor de  $P < 0.01$ , \*\*\* Significativo con un valor de  $P < 0.001$

En la interacción germoplasma por dosis de agua para la variable PG no se encontraron diferencias significativas (Cuadro 8), pero en los valores medios de PG en las dosis de agua por tipo de germoplasma (Cuadro 9), los híbridos semi-enanos produjeron valores superiores a los convencionales en un 5.2%, 3% y 7.3% para DAA, DMA y DBA respectivamente, además, el decremento de los valores de DMA a DBA fue menor en los híbridos semi-enanos (28%), en comparación con los convencionales (31%). Según lo reportado por Hedden (2001) y Cassani *et al.* (2011) la ganancia de rendimiento está estrechamente relacionada con la reducción de altura.

Cuadro 9. Valores medios de peso de grano (PG) por germoplasma a través de dosis de agua

Germoplasma	DAA	DMA	DBA
Semi-enano	0.121	0.102	0.073
Convencional	0.115	0.099	0.068

DAA = Dosis Alta de Agua, DMA = Dosis Media de Agua, DBA = Dosis Baja de Agua, Valores de PG en kg/planta

En la interacción dosis de agua por híbrido dentro de germoplasma para la variable PG, se encontraron diferencias significativas (Cuadro 8). Aunque no hubo un agrupamiento por híbrido por la prueba comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ); se puede interpretar, que los híbridos dentro del germoplasma son diferentes entre sí. Sango & Salvador (1998) reportaron que el uso de genes enanos no mejora el grano relativo de las líneas endogámicas del maíz, es decir, que el fondo genético que tienen los híbridos influye mayormente en el rendimiento de grano en condiciones de sequía (Beyene *et al.*, 2015). En los valores medios de PG por híbrido (Cuadro 10), se observó que no todos los híbridos semi-enanos tuvieron los valores mayores, lo cual afecta la interacción de germoplasma por dosis de agua.

Cuadro 10. Valores medios de peso de grano (PG) por híbrido a través de todos los tratamientos

Híbrido	PG
EXP1	0.106
EXP2	0.104
CARIBU	0.103
GARAÑON	0.095
EXP3	0.086
DK4050	0.085

Valores de PG en kg/planta

La prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) en la fuente de germoplasma clasificó al germoplasma semi-enano en el grupo a y al germoplasma convencional en el grupo b para las variables GH, GM, LM y PG a través de todos los tratamientos (Cuadro 11). En promedio los híbridos semi-enanos rindieron 5.3% más que los convencionales (0.099 vs. 0.094 kg/planta). Además, el IC de los híbridos semi-enanos es 9.1% superior con respecto a los convencionales (0.51 vs. 0.47). Peiffer *et al.* (2014) reportan que la reducción de altura en la planta reparte favorablemente el carbono y los nutrientes, entre el grano y la biomasa, mejorando la eficiencia del uso de fertilizantes y agua.

Cuadro 11. Prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) en la fuente germoplasma, para las variables granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM) y peso de grano (PG)

Germoplasma	GH	GM	LM	PG
Semi-enano	26.167a	435.636a	12.360a	0.099a
Convencional	23.938 b	404.722 b	11.733 b	0.094 b

Valores de GH en número de granos por hilera, GM en número de granos por mazorca, LM cm y PG en kg/planta

Respecto a los tratamientos per se, el análisis de varianza encontró diferencias significativas para la variable PG en las dosis de agua, además la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) clasificó a todos los tratamientos en diferente grupo (Cuadro 12), los valores de DAA fueron 18% y 68% superiores a DMA y DBA respectivamente.

Cuadro 12. Prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para peso de grano (PG) en dosis de agua

Dosis de Agua	PG
DAA	0.118a
DMA	0.100 b
DBA	0.070 c

DAA = Dosis Alta de Agua, DMA = Dosis Media de Agua, DBA = Dosis Baja de Agua, Valores de PG en kg/planta

Existen diferencias significativas en la interacción de germoplasma por dosis de nitrógeno para la variable PG (Cuadro 8), hubo una respuesta diferente por tipo de germoplasma a las dosis de nitrógeno. Aunque el análisis no arrojó prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), en el cuadro 13 podemos ver como los valores medios de PG para los híbridos semi-enanos son mayores en DAN y DMN, pero en DBN no hay diferencias.

Cuadro 13. Valores medios de peso de grano (PG) por germoplasma a través de dosis de nitrógeno

Germoplasma	DAN	DMN	DBN
Semi-enano	0.098	0.104	0.095
Convencional	0.097	0.090	0.095

DAN = Dosis Alta de Nitrógeno, DMN = Dosis Media de Nitrógeno y DBN = Dosis Baja de Nitrógeno, Valores de PG en kg/planta

En la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para dosis de nitrógeno, no hay diferencia en las dosis que se utilizaron; de acuerdo con estos resultados y lo reportado por Qiao *et al.* (2018), la producción de maíz en hidroponía requiere dosis bajas de nitrógeno.



7.2. Evaluación en macetas con suelo

7.2.1. Dosis de agua

Los materiales semi-enanos a través de los tratamientos de dosis de agua tuvieron medias mayores en comparación con los convencionales, para las variables GH, GM, DM, LG y PG, mientras que los convencionales tuvieron los valores mayores en HM, LM y MS (Cuadro 14). Las variables GH, GM y PG tienen valores mayores para los híbridos semi-enanos en comparación con los convencionales, similar a los resultados obtenidos en el primer ciclo de evaluación.

Cuadro 14. Valores medios por tipo de germoplasma para hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LG), peso de grano (PG) y materia seca (MS)

Germoplasma	HM	GH	GM	LM	DM	LG	PG	MS
Semi-enano	16.083	28.656	456.775	13.392	4.721	1.247	0.129	0.088
Convencional	16.649	22.438	379.964	13.458	4.631	1.172	0.110	0.122

Valores de HM en número de hileras por mazorca, GH en número granos por hilera, GM en número de granos por mazorca, LM, DM y LG en cm, valores de PG y MS en kg/planta

El análisis de varianza encontró diferencias significativas para todas las fuentes en la mayoría de las variables de respuesta (Cuadro 15), pero en la fuente dosis de agua por híbrido dentro de germoplasma, solo hubo diferencias significativas para las variables GH y LM.

Cuadro 15. Cuadrados medios de los componentes de varianza para hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LG)), peso de grano (PG) y materia seca (MS)

	HM	GH	GM	LM	DM	LG	PG	MS
Germoplasma	7.225**	870.074***	132745.876***	0.0973	0.178*	0.127***	0.0076***	0.02600***
Híbrido (Germoplasma)	12.410***	255.460***	44088.381***	10.966***	0.904***	0.029***	0.0014***	0.00059**
Dosis de Agua	4.327***	195.458***	122749.113***	14.058***	1.900***	0.064***	0.0138***	0.00320***
Germoplasma x Dosis de Agua	3.863**	71.216***	26858.775***	2.750***	0.122*	0.018***	0.0025***	0.00091***
Dosis de Agua x Híbrido (Germoplasma)	1.037	18.016*	4458.717	1.155**	0.047	0.001	0.00024	0.00011

\*Significativo con un valor de  $P < 0.05$ , \*\* Significativo con un valor de  $P < 0.01$ , \*\*\* Significativo con un valor de  $P < 0.001$

En la segunda evaluación, se encontraron diferencias significativas en la interacción germoplasma por dosis de agua, pero no en la interacción dosis de agua por híbrido dentro de germoplasma, contrario a lo obtenido en el primer año. Se podría interpretar que el rendimiento de los híbridos no solo depende del germoplasma semi-enano sino también de las líneas progenitoras que se utilizaron para formar el híbrido. Es importante revisar la base genética y método de selección que se utilizó para el desarrollo de los híbridos semi-enanos. Monneveux *et al.* (2006), reportaron la selección recurrente como un medio para mejorar el rendimiento en maíz tropical en condiciones de sequía, por su parte, Beyene *et al.* (2015) reportaron la selección genómica, como la más efectiva para aumentar el rendimiento de grano bajo estrés por sequía en maíz tropical.

La prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) en la fuente de germoplasma clasificó en diferente grupo a los híbridos semi-enanos y convencionales para las variables GH, GM, LG y PG (Cuadro 16), por segundo ciclo los híbridos semi-enanos en las variables GH, GM y PG tuvieron valores mayores con respecto a los convencionales. La media de PG fue 17.3% superior en los híbridos semi-enanos en comparación con los convencionales, además, en este ciclo de evaluación el IC de los híbridos semi-enanos es 25.4% superior a los convencionales (0.59 vs. 0.47). Estos resultados son acordes con los obtenidos por Vega *et al.* (1996), en donde los híbridos enanos fueron superiores al mejor testigo convencional en la producción de mazorca bajo riego.

Cuadro 16. Prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para las variables granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de grano (LG) y peso de grano (PG)

Germoplasma	GH	GM	LG	PG
Semi-enano	28.656a	456.77a	1.246a	0.129a
Convencional	22.438 b	379.96 b	1.172 b	0.110 b

Valores de GH en número de granos por hilera, GM en número de granos por mazorca, LG en cm y PG en kg/planta

La media de PG de los híbridos semi-enanos con respecto a los convencionales en los tratamientos de dosis de agua (Cuadro 17) fue superior 60% en VE-R6, 48% en V6-VT, 17% en R4-R6 y 3% para el tratamiento R1-R3; en el tratamiento Control, los híbridos convencionales fueron 8% superiores a los semi-enanos. En condiciones hídricas favorables no hay diferencia entre ambos tipos de germoplasma, pero conforme el estrés hídrico se incrementa los híbridos convencionales son mayormente afectados.

Cuadro 17. Valores medios de peso de grano (PG) por germoplasma a través de los tratamientos de dosis de agua

Germoplasma	Control	VE-R6	V6-VT	R1-R3	R4-R6
Semi-enano	0.152	0.099	0.137	0.124	0.132
Convencional	0.165	0.062	0.092	0.120	0.113

Valores de PG en kg/planta, VE=Emergencia, V6= 6 hojas, VT= Panoja masculina, R1=Emergencia de estigmas, R3=Grano lechoso, R4=Grano masoso, R6=Madurez Fisiológica

La prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para la variable PG en los tratamientos de dosis de agua (Cuadro 18), clasificó en el primer grupo al Control, después en un grupo b a los tratamientos que se les indujo estrés hídrico en las etapas fenológicas R4-R6, R1-R3 y V6-VT, por último, en el grupo c se ubicó el tratamiento VE-R6 el cual se mantuvo con estrés hídrico durante todo el ciclo de cultivo. Es decir, el estrés hídrico afecta significativamente

el rendimiento (Messina *et al.*, 2015; Zhan *et al.*, 2015), pero no existe diferencia entre el estrés hídrico en las etapas vegetativas (V6 – VT) y las etapas reproductivas (R1- R6), lo cual difiere de lo reportado por algunos investigadores (Nemali *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2014), quienes mencionan que la etapa de floración es la más sensible en el rendimiento de maíz.

Cuadro 18. Prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para la variable peso de grano (PG) en los tratamientos de dosis de agua

Tratamiento	PG
Control	0.158a
R4-R6	0.122 b
R1-R3	0.122 b
V6-VT	0.114 b
VE-R6	0.080 c

Valores de PG en kg/planta

Es importante mencionar que híbridos convencionales que sufrieron estrés hídrico en etapas reproductivas, tuvieron un retraso en la floración masculina y/o femenina tal como observaron Avendaño-Arrazate *et al.* 2008 y Villalobos-Gonzalez *et al.*, 2016, lo cual fue factor en el peso de algunas mazorcas de este germoplasma, a diferencia de los híbridos semi-enanos donde no se observó asincronía en floración.

#### 7.2.2. Dosis de nitrógeno

Los materiales semi-enanos a través de los tratamientos de dosis de nitrógeno, tuvieron medias mayores en comparación con los convencionales para las variables GH, GM y LG, mientras que los convencionales tuvieron los valores mayores en HM, LM, DM, PG y MS (Cuadro 19). En ambos años de evaluación, la media de la variable hileras por mazorca para los híbridos convencionales es mayor con respecto a los semi-enanos, así como el diámetro de mazorca, ambas variables están estrechamente relacionadas. Se demuestra que estos valores están dados por el tipo de germoplasma y no por los tratamientos a que fueron sometidos los

híbridos. Además, la media de la variable materia seca en ambos años de evaluación en los híbridos convencionales es mayor con respecto a los semi-enanos, esto debido a la diferencia en la altura de planta.

Cuadro 19. Valores medios por tipo de germoplasma para hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LG)), peso de grano (PG) y materia seca (MS)

Germoplasma	HM	GH	GM	LM	DM	LG	PG	MS
Semi-enano	15.068	26.535	427.518	12.455	4.591	1.211	0.120	0.085
Convencional	16.617	24.374	408.379	12.724	4.691	1.178	0.122	0.105

Valores de HM en número de hileras por mazorca, GH en número granos por hilera, GM en número de granos por mazorca, LM, DM y LG en cm, valores de PG y MS en kg/planta

El análisis de varianza encontró diferencias significativas (Cuadro 20) en las fuentes: germoplasma para las variables HM, GH, GM LM, DM, LG y MS; híbrido dentro de germoplasma para todas las variables; dosis de nitrógeno en todas las variables; germoplasma por dosis de nitrógeno para HM, GH y MS; dosis de nitrógenos por híbrido dentro de germoplasma para GH, GM, LM y DM.

Cuadro 20. Cuadrados medios de los componentes de varianza para hileras por mazorca (HM), granos por hilera (GH), granos por mazorca (GM), longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LG)), peso de grano (PG) y materia seca (MS)

	HM	GH	GM	LM	DM	LG	PG	MS
Germoplasma	64.786***	126.018***	9890.385**	1.952*	0.272***	0.029***	0.00010	0.01060***
Híbrido(Germoplasma)	10.889***	172.232***	20302.014***	6.089***	0.610***	0.013***	0.00038**	0.00070***
Dosis de Nitrógeno	80.082***	1244.333***	486661.428***	166.648***	9.620***	0.406***	0.05110***	0.01140***
Germoplasma x Dosis de Nitrógeno	2.394**	22.701***	2844.492	0.544	0.031	0.002	0.00011	0.00028**
Dosis de Nitrógeno x Híbrido (Germoplasma)	0.645	12.093***	2286.731*	1.343***	0.038*	0.001	0.00010	0.00008

\*Significativo con un valor de  $P < 0.05$ , \*\* Significativo con un valor de  $P < 0.01$ , \*\*\* Significativo con un valor de  $P < 0.001$

La prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) en la fuente de germoplasma clasificó al germoplasma semi-enano en el grupo a y al germoplasma convencional en el grupo b para las variables GH y LG (Cuadro 21), para la variable PG no hubo diferencia significativa.

Cuadro 21. Prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para las variables granos por hilera (GH) y longitud de grano (LG)

Germoplasma	GH	LG
Semi-enano	26.534a	1.211a
Convencional	24.374 b	1.178 b

Valores de LG en cm

La prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para la variable PG entre tratamientos de nitrógeno (Cuadro 22), clasificó como similares a los dos tratamientos de 450 UN, al tratamiento 300 UN en 3 aplicaciones como similar al de 450 UN con dos aplicaciones, después al tratamiento 300 UN en 2 aplicaciones, luego al de 150 UN en dos aplicaciones y por último se clasificó al tratamiento con 0 UN.

Mueller & Vyn (2016) mencionan que la captación de nitrógeno posterior a la emergencia de estigmas (R1) se correlaciona positivamente con el rendimiento de maíz, como se observó en el tratamiento 300 UN en tres aplicaciones, en donde la tercera aplicación se realizó después de la emergencia de los estigmas y tuvo valores similares al tratamiento de 450 UN en dos aplicaciones. De acuerdo con Pan *et al.* (2017), la sincronización del suministro de nitrógeno en el suelo después de la emergencia de estigmas incrementó el índice de área foliar y tasa fotosintética, al tiempo que prolongó la supervivencia de la raíz de la planta, la acumulación de materia seca y el rendimiento de grano.

El valor promedio mayor de PG se obtuvo con el tratamiento 450 UN en cuatro aplicaciones, aunque estadísticamente no fue diferente al tratamiento de 450 UN en dos aplicaciones (Cuadro 22). Por lo anterior, es importante implementar estrategias de manejo de nitrógeno posteriores a la formación de estigmas, debido a que después de la cosecha, el

nitrógeno residual en el suelo puede tener alto impacto negativo en el medio ambiente (Pan *et al.*, 2017).

Cuadro 22. Prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para la variable peso de grano (PG) en los tratamientos de nitrógeno

Tratamiento	PG
450 UN (4A)	0.161a
450 UN (2A)	0.154ab
300 UN (3A)	0.149 b
300 UN (2A)	0.140 c
150 UN (2A)	0.100 d
0 UN	0.022 e

Valores de PG en kg/planta

En los tratamientos 300 UN (3A) y 450 UN (2A), los valores medios fueron similares para ambos tipos de germoplasma, pero considerando la altura, los híbridos semi-enanos podrían tener una ventaja, ya que distribuir las 300 UN en 3 aplicaciones con maquinaria es posible en estos híbridos, pero no en convencionales; esto implica ahorro en el costo del fertilizante nitrogenado, menor probabilidad de pérdida por evaporación/lixiviación y consecuentemente menor contaminación del medio ambiente.

Se encontraron diferencias significativas en la variable PG entre dosis de nitrógeno e híbrido dentro de germoplasma, pero no hubo diferencias significativas por el tipo de germoplasma, germoplasma por dosis de nitrógeno y dosis de nitrógeno por híbrido dentro de germoplasma; además, debido a que no se agruparon los valores de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para la interacción de germoplasma por dosis de nitrógeno, no se podría concluir si los híbridos semi-enanos son más eficientes en el uso del nitrógeno.

Es importante realizar más investigación sobre las raíces de los híbridos semi-enanos, según lo reportado por Zhan *et al.* (2015), muchos cultivos han reportado variaciones genotípicas en la raíz que ayudan funcionalmente para la adquisición de recursos del suelo, mejorando así, los rendimientos en condiciones de estrés hídrico y deficiencia de nutrientes.



## 8. CONCLUSIONES

En el primer ciclo de evaluación bajo un sistema hidropónico no hubo diferencias significativas entre los híbridos semi-enanos y los convencionales para las dosis de agua.

En el segundo ciclo de evaluación sobre suelo, los híbridos semi-enanos demostraron mayor tolerancia a niveles bajos de agua en las diferentes etapas de crecimiento (vegetativas y reproductivas).

El índice de cosecha para ambos ciclos de evaluación fue mayor en los híbridos semi-enanos para los tratamientos de dosis de agua, repartiendo eficientemente el agua en la biomasa de la planta.

En el primer ciclo de evaluación, los híbridos semi-enanos y convencionales evaluados mostraron la misma eficiencia en el uso del nitrógeno, en condiciones de hidroponía.

En el segundo ciclo de evaluación, al realizar más de dos aplicaciones de nitrógeno a lo largo de ciclo del cultivo, el rendimiento de grano incremento en ambos tipos de germoplasma utilizando las mismas dosis de nitrógeno.

Los híbridos semi-enanos son una opción viable para los programas de mejoramiento que tienen como objetivo desarrollar maíces con tolerancia a estrés hídrico y uso eficiente del nitrógeno, siendo importante la base genética que se utiliza para el desarrollo de híbridos semi-enanos.

## 9. LITERATURA CITADA

- Anderson, J.C. & Chow, P.N. (1960). Phenotypes and grain yield associated with br2 gene in single cross hybrids of dent corn. *Crop Science*, 1:335–337
- Avendaño-Arrazate, C.H., Molina-Galán, J.D., Trejo-López, C., López-Castañeda, C. & Cadena-Iñiguez, J. (2008). Respuesta a altos niveles de estrés hídrico en maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 19(1):27-37
- Bänziger, M., Edmeades, G.O., Beck, D. & Bellon, M. (2012). Mejoramiento para aumentar la tolerancia a sequía y la deficiencia de nitrógeno en el maíz: In: CIMMYT. (Ed.). De la teoría a la práctica. México, D. F., CIMMYT. 61p
- Barker, T., Campos, H., Cooper, M., Dolan, D., Edmeades, G., Habben, J., Schussler, J., Wright, D. & Zinselmeier, C. (2005). Improving drought tolerance in maize. *Plant Breeding Reviews*, 25:173–253
- Beyene, Y., Semagn, K., Mugo, S., Tarekegne, A., Raman, B., Meisel, B., & ... Crossa, J. (2015). Genetic gains in grain yield through genomic selection in eight bi-parental maize populations under drought stress. *Crop Science*, 55(1):154-163.
- Bian, D., Jia, G., Cai, L., Ma, Z., Cui, Y., & Eneji, A. E. (2016). Effects of tillage practices on root characteristics and root lodging resistance of maize. *Field Crops Research*, 185:89-96
- Bolaños, J.A. & Edmeades, G.O. (1993). La fenología del maíz (No. CIS-2553. CIMMYT.)
- Bruce, W.B., Edmeades, G.O. & Barker, T.C. (2002). Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 53(366):13-25
- Campos, H., Cooper, M., Habben, J.E., Edmeades, G.O., & Schussler, J.R. (2004). Improving drought tolerance in maize: a view from industry. *Field Crops Research*, 90(1): 19-34
- Cassani, E., Villa, D., Durante, M., Pilu, R. & Landoni, M. (2011). The brachytic 2 and 3 maize double mutant shows alterations in plant growth and embryo development. *Plant Growth Regulation*, 64(2):185-192

- Duvick, D.N. (2005). Genetic progress in yield of United States maize (*Zea mays* L.) *Maydica*, 50:193-202
- Eivazi, A. & Habibi, F. (2013). Evaluation of nitrogen use efficiency in corn (*Zea mays* L.) varieties. *World Applied Sciences Journal*, 21(1):63-68
- García, M. & Watson, C. (2003). Herencia de la resistencia al acame de raíces en maíz dulce (*Zea mays* L.). *Revista UDO Agrícola*, 3(1):24-33
- Hedden, P. (2003). Research Focus: The genes of the Green Revolution. *Trends In Genetics*, 19(1):5-9
- Lafitte, H.R. (1993). Identificación de problemas en la producción de maíz tropical: Guía de campo. México, D.F.: CIMMYT
- Lafitte, H.R. (2001). Fisiología del maíz tropical. En: R.L. Paliwal *et al.*, editores, *El maíz en los trópicos. Mejoramiento y producción*. FAO, Roma, ITA. pp. 29-36
- Luna, B., Hinojosa, M., Ayala, O., Castillo, F. & Mejía, A. (2012). Perspectivas de desarrollo de la industria semilla de maíz en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 5(1):1-7
- Mao, H., Wang, H., Liu, S., Li, Z., Yang, X., Yan, J. & ... Qin, F. (2015). A transposable element in a NAC gene is associated with drought tolerance in maize seedlings. *Nature Communications*, 6(9):1-13
- Messina, C.D., Sinclair, T.R., Hammer, G.L., Curan, D., Thompson, J., Oler, Z., Gho, C. & Cooper, M. (2015). Limited-transpiration trait may increase maize drought tolerance in the US corn belt. *Agronomy Journal*, 107(6):1978-1986
- Monneveux, P., Sanchez, C., Beck, D. & Edmeades G.O. (2006). Drought tolerance improvement in tropical maize source populations: evidence of progress. *Crop Science*, 46:180-191
- Mounce, R.B., O'Shaughnessy, S.A., Blaser, B.C., Colaizzi, P.D. & Evett, S.R. (2016). Crop response of drought-tolerant and conventional maize hybrids in a semiarid environment. *Irrigation Science*, 34(3):231-244

- Mueller, S.M. & Vyn, T.J. (2016). Maize plant resilience to N stress and post-silking N capacity changes over time: a review. *Frontiers in plant science*, 7(53):1-14
- Nemali, K.S., Dohleman, F.G., Stephens, M., Reeves, W.R., Nelson, D.E., Whitsel, J.E., & ... Castiglioni, P. (2015). Physiological responses related to increased grain yield under drought in the first biotechnology-derived drought-tolerant maize. *Plant Cell and Environment*, 38(9):1866-1880
- OGTR. (2008). The biology of *Zea mays* L. ssp *mays* (maize or corn). Australian Government. Department of Health and Ageing. Office of the gene technology regulator. pp. 20-43
- Paliwal, R.L. (2001). Morfología del maíz tropical. En: R.L. Paliwal *et al.*, editores, El maíz en los trópicos. Mejoramiento y producción. FAO, Roma, ITA. pp. 21-28
- Pan, J., Meng, Q., Chen, R., Cui, Z. & Chen, X. (2017). In-season nitrogen management to increase grain yields in maize production. *Agronomy Journal*, 109(5):2063-2071
- Panorama Agroalimentario. (2016). Dirección de Investigación y evaluación económica y social. FIRA. pp. 14-18
- Peiffer, J.A., Romay, M.C., Gore, M.A., Flint-Garcia, S.A., Zhang, Z.W., Millard, M.J. & ... Buckler, E.S. (2014). The genetic architecture of maize height. *Genetics*, 196(4):1337-1356
- Pendleton, J.W. & Seif, R.D. (1961). Plant population and row spacing studies with brachytic 2 dwarf corn. *Crop Science*, 1:433-435
- Pilu, R., Cassani, E., Villa, D., Curiale, S., Panzeri, D., Cerino, F. & Landoni, M. (2007). Isolation and characterization of a new mutant allele of brachytic 2 maize gene. *Molecular Breeding*, 20:83-91
- Qiao, S., Fang, Y., Wu, A., Xu, B., Zhang, S., Deng, X., Djalovic, I., Siddique, K. H. M. & Chen, Y. (2018). Dissecting root trait variability in maize genotypes using the semi-hydroponic phenotyping platform. *Plant and Soil*, 432:1-16
- Rincón-Tuexi, J.A., Castro-Nava, S., López-Santillán, J.A., Huerta, A.J., Trejo-López, C. & Briones-Encinia, F. (2006). Temperatura alta y estrés hídrico durante la floración en poblaciones de maíz tropical. *Revista Internacional de Botánica Experimental*, 75:31-40

- Ritchie, S.W. & Hanway, J.J. (1982). How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Techonlogy. Cooperative Extension Services Ames, Iowa. Special Report N°48
- Rosabal, A.L., Martínez, G.L., Reyes, G. Y., Dell'Amico, R.J. & Núñez, V.M. (2014). Aspectos fisiológicos, bioquímicos y expresión de genes en condiciones de déficit hídrico. Influencia en el proceso de germinación. *Cultivos Tropicales*, 35(3):24-35
- Saengwilai, P., Tian, X. & Lynch, J.P. (2014). Low crown root number enhances nitrogen acquisition from low-nitrogen soils in maize. *Plant Physiology*, 166:581-589
- Sadras, V., Ferreiro, M., Gutheim, F. & Kantolic, A. (2002). Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperiodo. En: F. Andrade & V. Sadras, ed., *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*, 2nd ed. Balcarce: M. Mercedes Rebaudi, pp.175-210
- Sammons, B., Whitsel, J., Stork, L. G., Reeves, W. & Horak, M. (2015). Characterization of drought-tolerant maize MON 87460 for use in environmental risk assessment. *Crop Science*, 54(2):719-729
- Sango, L. & Salvador, R.J. (1998). Influence of plant height and of leaf number on maize production at high densities. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 33(3):297-306
- Simons, M., Saha, R., Guillard, L., Clément, G., Armengaud, P., Canas, R., Maranas, C. D., Lea, P. J. & Hirel, B. (2014). Nitrogen-use efficiency in maize (*Zea mays* L.): from 'omics' studies to metabolic modelling. *Journal of Experimental Botany*, 65(19):5657-5671
- Sharp, R.E., Poroyko, V., Hejlek, L.G., Spollen, W.G., Springer, G.K., Bohnert, H.J. & Nguyen, H.T. (2004). Root growth maintenance during water deficits: physiology to functional genomics. *Journal of Experimental Botany*, 55(407):2343-2351
- Vega, M.C., Arreola, J., Guerrero, J.L., Navarro, E. & Espinoza, J. (1996). Comportamiento de Líneas S<sub>1</sub> de Maíz Bajo Condiciones de Humedad Restringida. En: Edmeades, G.O., Bänzinger, M., Mickelson, H.R. & Peña-Valdivia, C.B. *Developing drought and low N tolerant maize. Proceedings of a Symposium. CIMMYT, El Batán, México.* pp. 304-308
- Vigouroux, Y., Glaubitz, J.C., Matsuoka, Y., Goodman, M.M., Sánchez, J. & Doebley, J. (2008). Population structure and genetic diversity of New World maize landraces assessed by DNA microsatellites. *American Journal of Botany*, 95:1240-1253

- Villalobos-Gonzalez, A., Lopez-Castañeda, C., Miranda-Colín, S., Aguilar-Rincon, V.H. & Lopez-Hernandez, M.B. (2016). Relaciones hídricas en maíces de Valles Altos de la Mesa Central de México en condiciones de sequía y fertilización nitrogenada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7):1651-1665
- Vogler, H. & Kuhlemeier, C. (2003). Simple hormones but complex signalling. *Current Opinion Plant Biology*, 6:51–56
- Xing, A., Gao, Y., Zhang, W., Cai, L., Yang, X., Li, J. & ... Yan, J. (2015). A rare SNP mutation in *Brachytic2* moderately reduces plant height and increases yield potential in maize. *Journal of Experimental Botany*, 66(13):3791-3802
- Xu, J., Fengkai, W., Gengyun, Z., Guangtang, P., Hai, L., Jing, W. & ... Yunbi, X. (2014). Identification of candidate genes for drought tolerance by whole-genome resequencing in maize. *BMC Plant Biology*, 14(1):83
- Yu, P., Li, X., White, P.J. & Li, C. (2015) A large and deep root system underlies high nitrogen-use efficiency in maize production. *PLoS ONE*, 10(5): e0126293
- Zhan, A., Schneider, H. & Lynch, J. P. (2015). Reduced lateral root branching density improves drought tolerance in maize. *Plant Physiology*, 168(4):1603-1615
- Zhou, Z., Zhang, C., Zhou, Y., Hao, Z., Wang, Z., Zeng, X. & ... Li, X. (2016). Genetic dissection of maize plant architecture with an ultra-high density bin map based on recombinant inbred lines. *BMC Genomics*, 17(178):1-15