

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
POSTGRADO DE AGRONOMÍA

IDENTIFICACIÓN DE GENOTIPOS DE CARAOTA (*Phaseolus vulgaris* L.)
TOLERANTES AL DÉFICIT HÍDRICO A TRAVÉS DE CARACTERÍSTICAS
MORFO-FISIOLÓGICAS Y AGRONÓMICAS

Autor: Carlos Miguel Hamón Da Silva

Tutora: Dra. Catalina Ramis

Maracay, Abril 2017



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
COMISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
POSTGRADO EN AGRONOMÍA
VEREDICTO



Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo de Grado presentado por: **CARLOS MIGUEL HAMÓN DA SILVA C.I. 19.363.159**, bajo el título "IDENTIFICACIÓN DE GENOTIPOS DE CARAOTA (*Phaseolus vulgaris* L.) TOLERANTES AL DÉFICIT HÍDRICO A TRAVÉS DE CARACTERÍSTICAS MORFO-FISIOLÓGICAS Y AGRONÓMICAS", a fin de cumplir con el requisito legal para optar al grado académico de **Magíster Scientiarum en Agronomía**, dejan constancia de lo siguiente:

1.- Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los miembros del jurado, se fijó el día 24 de marzo de 2017 a las 09:00 am., para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que éste hizo en el Salón N° 2 de la ESAT (Escuela Socialista de Agricultura Tropical), mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió satisfactoriamente a las preguntas que le fueron formuladas por el jurado, todo ello conforme con lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

2.- Finalizada la defensa del trabajo, el jurado decidió **APROBARLO**, por considerar, sin hacerse solidario con la ideas expuestas por el autor, que se ajusta a lo dispuesto y exigido en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

Para dar este veredicto, el jurado estimó que el trabajo examinado representa un aporte en cuanto a la metodología de evaluación de la tolerancia al déficit hídrico en condiciones de campo, pionera en caraota para Venezuela. Se destaca la discusión coherente e integral considerando la explicación del fenómeno biológico con el uso adecuado de diversas herramientas estadísticas, aplicando conceptos de vanguardia tanto del mejoramiento genético como de la ecofisiología. El trabajo

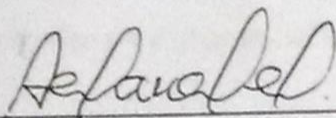
[Handwritten signatures]



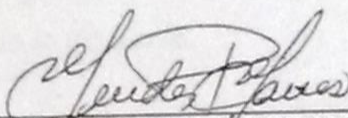
presentado abre una nueva línea de investigación en la búsqueda de los mecanismos de tolerancia al estrés por déficit hídrico que mostraron algunos genotipos.

Todo lo anteriormente señalado, aunado a una capacidad y actitud personal del autor, motiva al jurado, por unanimidad, el otorgar la calificación de **EXCELENTE**.

En fe de lo cual se levanta la presente ACTA, a los 24 días del mes de marzo del año 2017, conforme a lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado, actuó como Coordinadora del jurado la Dra. Catalina Ramis.



Dra. ADA M. MEDINA
C.I. 6.124.407
AGRONOMÍA-UCV



Dra. MERCEDES PÉREZ MACÍAS
C.I. 5.145.642
INIA-CENIAP



Dra. CATALINA RAMIS
C.I. 5.614.038
AGRONOMÍA-UCV
Tutora

CR/zp
24/03/17

Trabajo de Grado presentado como requisito final para optar al título de *Magister Scientiarum* en Agronomía, orientación Mejoramiento de Plantas y Biotecnología Agrícola.

Prof. Catalina Ramis

Tutor

Prof. Rosalía Velásquez

Asesor

DEDICATORIA

A mis padres María y Miguel por darme su apoyo incondicional en todo momento.

A mi esposa Raydel por su amor, paciencia y su apoyo continuo a lo largo de la realización de este trabajo.

A mi hijo Esteban por ser una fuente infinita de amor y de estímulo en la culminación de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A Jehová Dios, por ser nuestro creador y merecedor de toda honra.

A mi casa de estudios, la Universidad Central de Venezuela, la casa que vence las sombras, por darme la oportunidad de formarme junto a un excelente grupo de profesores.

A mi tutora, Prof. Catalina Ramis por su apoyo y enseñanza tanto a nivel académico como personal y profesional siendo un ejemplo de ética, laboriosidad y compromiso hacia la excelencia.

Al Ing. Agrónomo José Manosalva por su gran colaboración en el manejo agronómico de los ensayos en campo.

A los Bachilleres Leonardo Méndez y Ángela Silva por su gran colaboración en el manejo agronómico del cultivo tanto en campo como en invernadero así como su ayuda en la medición de variables agrómicas.

A la Prof. Mercedes Pérez por su asesoría y colaboración en las evaluaciones fisiológicas realizadas, así como por sus buenos consejos en la redacción del manuscrito.

A la Directora del Instituto de Genética Prof. Rosalía Velásquez y al Director del Instituto de Agronomía Prof. Humberto Moratinos de la Facultad de Agronomía de la UCV por facilitar las instalaciones para la realización de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
TABLA DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
ANTECEDENTES	5
Generalidades del cultivo de caraota.....	5
a. Origen y Domesticación.....	6
b. Problemas de Producción.....	7
Tolerancia al déficit hídrico.....	8
a. Escape a la sequía.....	8
b. Evasión a la sequía.....	9
c. Tolerancia a la sequía.....	11
d. Recuperación.....	11
Programas de mejoramiento para tolerancia a déficit hídrico.....	11
Germoplasma disponible.....	13
Índices para la evaluación de genotipos a sequía.....	14
MATERIALES Y MÉTODOS	17
Evaluación en Campo.....	17
Evaluación en Invernadero.....	26
Análisis discriminante de las variables asociadas a la tolerancia a déficit hídrico.....	29

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
Evaluación en Campo.....	32
Evaluación en Invernadero.....	91
Análisis discriminante de las variables asociadas a la tolerancia al déficit hídrico.....	104
CONCLUSIONES	119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

ÍNDICE DE CUADROS

N°	Contenido	Pág.
1	Fórmulas para calcular los diferentes índices de sequía y la interpretación para la identificación de genotipos tolerantes al déficit hídrico.....	16
2	Identificación y pedigrí de 21 accesiones de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) utilizadas en la evaluación en campo para tolerancia a la sequía.....	18
3	Porcentaje de Emergencia a los 15 días después de siembra promedio de cada genotipo para cada ensayo.....	36
4	Estadísticos descriptivos para las variables altura de planta, vigor y porcentaje de plantas.....	37
5	Cuadrados medios del análisis de varianza por ambiente para las variables altura de planta y vigor.....	38
6	Prueba de homogeneidad de varianzas de Hartley para las variables altura de planta y vigor.....	38
7	Cuadrados medios del análisis de varianza combinado para las variables altura de planta y vigor.....	39
8	Prueba de medias de Duncan para las variables altura de planta y vigor.....	40
9	Criterios de clasificación del hábito de crecimiento en caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	41
10	Estadísticos descriptivos de variables fenológicas evaluadas.....	44
11	Análisis de varianza por ambiente para todas las variables fenológicas evaluadas.....	45
12	Cuadrados medios del error y prueba de Hartley para las variables fenológicas evaluadas.....	45
13	Análisis de la varianza combinado para las variables fenológicas evaluadas...	48
14	Prueba de medias de Duncan para las variables Grado de desarrollo y Días a floración.....	49

15	Prueba de medias de Duncan para las variables Días a madurez fisiológica y Días de llenado de grano.....	51
16	Estadísticos descriptivos obtenidos para las variables fisiológicas evaluadas..	56
17	Análisis de varianza para las variables fisiológicas evaluadas en ensayos de riego y sequía.....	56
18	Prueba de homogeneidad de varianzas de Hartley para las variables fisiológicas evaluadas.....	58
19	Análisis de la varianza combinado para variables fisiológicas evaluadas.....	58
20	Prueba de medias de Duncan según resultados obtenidos en análisis combinado para los índices de particionamiento de la biomasa evaluados.....	59
21	Prueba de medias de Duncan para la variable Lectura SPAD.....	62
22	Estadísticos descriptivos para las variables Gr por planta y Rendimiento estimado (kg.ha ⁻¹).....	63
23	Análisis de varianza por ambiente para las variables Gr por planta y Rendimiento estimado (kg.ha ⁻¹).....	64
24	Prueba de homogeneidad de varianzas de Hartley para las variables Gr por planta y Rendimiento estimado (kg.ha ⁻¹).....	64
25	Análisis de la varianza combinado para las variables Gr por planta y Rendimiento estimado (kg.ha ⁻¹).....	65
26	Prueba de medias de Duncan para las variables Gr por planta y Rendimiento estimado (kg.ha ⁻¹).....	67
27	Estadística descriptiva para las variables Vainas por planta, Semillas por vaina y Peso de 100 semillas.....	69
28	Análisis de varianza por ambiente para las variables Vainas por planta, Semillas por vaina y Peso de 100 semillas.....	70
29	Prueba de homogeneidad de varianza de Hartley para las variables Vainas por planta, Semillas por vaina y Peso de 100 semillas.....	70
30	Análisis de la varianza combinado para las variables Vainas por Planta, Semillas por Vaina y Peso de 100 Semillas.....	72

31	Prueba de medias de Duncan para las variables Peso de 100 semillas y Vainas por planta	74
32	Prueba de medias de Duncan para la variable Semillas por vaina.....	75
33	Análisis de la varianza de los índices de sequía calculados para las variables Vainas por planta y Semillas por vaina.....	78
34	Prueba de medias de Duncan de los índices de sequía para la variable Vainas por planta.....	79
35	Prueba de medias de Duncan de los índices de sequía para la variable Semillas por vaina.....	81
36	Análisis de la varianza para los índices de sequía calculados a las variables fenológicas Días a floración y Días a madurez fisiológica.....	82
37	Prueba de medias de Duncan de los índices de sequía para la variable Días a floración.....	84
38	Prueba de medias de Duncan de los índices de sequía para la variable Días a madurez fisiológica.....	86
39	Análisis de varianza para los índices de sequía calculados a las variables fisiológicas Índice de cosecha a vaina y Lectura SPAD.....	87
40	Prueba de medias de Duncan de los índices de sequía para la variable Índice de cosecha a vaina.....	89
41	Prueba de medias de Duncan de los índices de sequía para la variable Lectura SPAD.....	90
42	Estadísticos descriptivos de las variables morfológicas evaluadas en invernadero a los 0, 7 y 14 días del déficit hídrico.....	92
43	Estadísticos descriptivos de las variables fisiológicas evaluadas en invernadero a los 0, 7 y 14 días del déficit hídrico.....	96
44	Estadísticos descriptivos para las variables fisiológicas evaluadas a los 14 días del déficit hídrico en caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) en condiciones de invernadero.....	100

45	Análisis de la varianza para las variables fisiológicas evaluadas a los 14 días del déficit hídrico en caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) en condiciones de invernadero.....	100
46	Prueba de medias de Duncan para las variables Biomasa total (gr) y Biomasa viva (%) de 19 genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) evaluados en invernadero a los 14 días después de la aplicación del último riego.....	101
47	Coeficientes de correlación (r) entre las variables morfo-fisiológicas evaluadas en campo y el rendimiento en condiciones de riego y sequía.....	106
48	Valores propios, varianza absoluta y acumulada explicada por los componentes principales 1 a 10 considerando características fenológicas y agronómicas de 21 genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) evaluados en dos condiciones de manejo hídrico: riego y sequía.....	107
49	Importancia relativa para los componentes principales 1 a 5 de las características fenológicas y agronómicas evaluadas en 21 genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) bajo dos condición de suplencia hídrica contrastante, riego y sequía.....	108
50	Importancia relativa para los componentes principales 1 a 5 de las características fenológicas y agronómicas evaluadas en 21 genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) bajo condición de riego.....	109
51	Importancia relativa para los componentes principales 1 a 5 de las características fenológicas y agronómicas evaluadas en 21 genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) bajo condición de sequía.....	110
52	Coeficiente de correlación (r) entre las variables morfo-fisiológicas evaluadas en invernadero y Biomasa viva (%) en condiciones de déficit hídrico severo.....	111
53	Heredabilidad en sentido amplio (h^2) de las variables evaluadas en campo asociadas con el rendimiento en condiciones de sequía y Biomasa viva (%) evaluada en invernadero.....	112

54	Recomendación de genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) como progenitor y/o cultivar en base a las variables asociadas con la tolerancia a la sequía.....	116
----	---	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

N°	Contenido	Pág.
1	Temperatura mínima y máxima, Evaporación y Precipitación durante el ciclo del cultivo.....	32
2	Contenido de humedad del suelo para los ensayos con y sin sequía durante la aplicación de los tratamientos hídricos contrastantes.....	34
3	Valores promedios de Porcentaje de plantas erectas por cada genotipo en cada ensayo evaluado.....	43
4	Polígono de frecuencia para la variable Días a mitad de llenado de vainas en los ensayos de riego y sequía.....	47
5	Rendimiento en kg.ha ⁻¹ bajo condiciones de riego y sequía de 21 genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	68
6	Área foliar (AF) de los 19 genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) evaluados a los 7 y 14 días del periodo del déficit hídrico.....	93
7	Área foliar específica (AFE) de los 19 genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) evaluados a los 7 y 14 días del periodo del déficit hídrico.....	94
8	Unidades de valores SPAD para los 19 genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) evaluados a los 7 y 14 días del periodo del déficit hídrico.....	97
9	Foliolos de los genotipos UCV-56 (izquierda) e I-2368 (derecha) a los 7 días (izquierda) y 14 días (derecha) del periodo del déficit hídrico.....	97
10	Temperatura foliar de 19 genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) evaluados a los 7 y 14 días del periodo del déficit hídrico.....	99
11	Proporción de Biomasa viva (%) y Biomasa muerta (%) de 19 genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) evaluados en invernadero a los 14 días después de la aplicación del último riego.....	103
12	Análisis Biplot de la dispersión de 21 genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) evaluados en dos condiciones de manejo hídrico (+riego y ●sequía) en los dos primeros componentes principales, con base en características fenológicas y agronómicas.....	111

13	Análisis Biplot de la dispersión de 21 genotipos de caraota (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) evaluados en dos condiciones de manejo hídrico (+riego y ●sequía) en los componentes principales 2 y 3, con base en características fenológicas y agronómicas.....	112
----	--	-----

RESUMEN

En América Latina el 60 % de los campos agrícolas sembrados con caraota sufren de déficit hídrico en alguna de las etapas del desarrollo del cultivo. Aunque *P. vulgaris* L. es considerada una especie sensible a la sequía, el efecto varía según la etapa en la cual ocurra, siendo la etapa de prefloración hasta el llenado de grano las más sensibles, generando pérdidas entre el 10% y 100% del cultivo. Es por ello que se planteó como objetivo la evaluación de germoplasma de caraota a fin de identificar genotipos tolerantes al déficit hídrico. Un total de 21 genotipos fueron evaluados en campo bajo condiciones hídricas contrastantes y 19 en invernadero bajo condición de déficit hídrico severo. En condiciones de campo, se observó una respuesta diferencial entre los genotipos para las variables fenológicas, morfológicas, fisiológicas y agronómicas evaluadas con condiciones de riego y sequía evidenciando el efecto del estrés sobre el desarrollo del cultivo. El genotipo UCV-56 mostró tanto el mayor nivel de tolerancia como la mayor productividad en condiciones de riego y sequía. Adicionalmente, los genotipos UCV-56, I-2041 e I-2019 mostraron el mayor % de biomasa viva a pesar del déficit hídrico severo aplicado en condiciones de invernadero. Las variables: vainas por planta, peso de 100 semillas, proporción de plantas erectas, días a mitad de llenado de vainas, % de biomasa viva y lectura SPAD mostraron una correlación significativa con el rendimiento en condiciones de sequía y moderada heredabilidad en sentido amplio indicando no solo que son caracteres morfo-fisiológicos favorables para la tolerancia a la sequía sino además que son ideales como criterios de selección.

Palabras claves: pre-mejoramiento, variables fisiológicas, sequía, cambio climático, estrés hídrico, rendimiento, heredabilidad.

ABSTRACT

In Latin America 60% of agricultural fields planted with black beans suffer from water deficit at one of the stages of the cultivar development. Even though *P. vulgaris* L. is considered one species sensible to drought stress, the effect varies depending on the stage in which it occurs, being early flowering up to grain development stage the most sensible ones, generating losses between 10 to 100% of crop. For this reason, the objective was the evaluation of black bean germplasm to identify genotypes tolerant to water deficit. A total of 21 genotypes were evaluated in field under contrasting water conditions and 19 in glass house under severe water deficit conditions. In field conditions, it was observed a differential response between genotypes for phenological, morphological, physiological and agronomic variables evaluated in irrigation conditions and drought making evident the stress effect in crop development. UCV-56 genotype showed both the highest level of tolerance and the highest productivity in irrigation and drought conditions. Additionally, UCV-56, I-2041 and I-2019 genotypes showed mayor % of alive biomass despite the severe water deficit applied under glass house conditions. The variables: pods per plant, weight seeds, plants erects proportion, days to mild pods fill and % of alive biomass showed a significant correlation with yield under drought conditions and moderate heritability in a broad sense indicating not only that they are morphological and physiological characters favorable for drought tolerance but also that they are ideal as selection criteria.

Keywords: pre-breeding, physiological variables, drought, climate change, drought stress, yield, heritability.

INTRODUCCIÓN

La caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) es la leguminosa más importante para la alimentación en el trópico de América Latina y África oriental y meridional, siendo una fuente poco costosa de proteínas y calorías para la población (Polania *et al.*, 2012). Actualmente, en la mayoría de las zonas productoras de caraota los rendimientos potenciales nunca son alcanzados, esto se debe a que se cultiva principalmente en condiciones ambientales poco favorables, como son la poca utilización de insumos agrícolas y la escasa y errática precipitación pluvial durante la etapa de crecimiento (Rodríguez *et al.*, 2009).

En América Latina el 60 % de los campos agrícolas sembrados con caraota sufren de déficit hídrico o sequía en alguna etapa del desarrollo (Rodríguez *et al.*, 2009). Esto indica que los cultivares de esta especie deben tolerar períodos de sequía alguna vez durante su ciclo de vida, lo cual debe representar algún costo para el rendimiento del cultivo. Aunque *Phaseolus vulgaris* L. es considerada una especie sensible a la sequía, el efecto varía según la etapa en la cual ocurra el déficit hídrico, siendo las etapas comprendidas desde la prefloración hasta el llenado de grano las más sensibles (Moyeja, 1997; Mayor, 2010).

Se ha reportado que la sequía genera pérdidas entre el 10% y 100% del cultivo. Además, esta condición favorece la aparición de nuevas plagas y enfermedades junto con el aumento de las ya existentes. Por tal motivo, la sequía se considera la segunda causa más importante en la reducción del rendimiento (Polania *et al.*, 2012).

Algunas de las estrategias utilizadas para contrarrestar los efectos de la sequía son el riego suplementario, fechas de siembra en períodos de disponibilidad de agua y otras prácticas de manejo agronómico. Sin embargo, han sido de poca utilidad ya que el alto costo de la infraestructura necesaria y los rubros asociados, impiden que los agricultores de bajos recursos accedan a estas prácticas.

En cuanto a esto, los modelos climáticos globales predicen que las regiones tropicales se volverán más secas producto del calentamiento global (Williams *et al.*, 2007). Así, el desarrollo o identificación de cultivares con características que les permitan minimizar la pérdida de su potencial productivo, debido al déficit hídrico, es una estrategia que permitirá enfrentar la amenaza de las consecuencias del cambio climático y así contribuir a la seguridad alimentaria de una población creciente, que requiere de incrementos significativos en la producción de alimentos (Perdomo, 2014).

Es por ello que el mejoramiento genético para tolerancia al déficit hídrico en caraota ya tiene un gran historial en México, Honduras, Brasil y Colombia. Además de eso, países como Cuba, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Nicaragua, Kenia, Sudan, Etiopia y otros en el oriente de África han logrado avances significativos con evaluaciones de líneas avanzadas (Polania, 2011). Sin embargo, en Venezuela son pocas las investigaciones que se han hecho con relación a este tema, considerando que al igual que en estos países la caraota forma parte principal de la dieta alimenticia de la población y el déficit hídrico es una de las principales limitantes en su producción.

Es conocido que son muchos los mecanismos morfológicos y fisiológicos que pueden presentar las plantas para tolerar la sequía, sin embargo, la identificación de los mismos es difícil debido a que éstos son de naturaleza cuantitativa por lo que su estudio es complejo. Por esta razón es importante seleccionar los métodos de evaluación de germoplasma más efectivos para la identificación de genotipos tolerantes (Perdomo, 2014). Es allí donde el pre-mejoramiento o valorización del germoplasma se convierte en una estrategia útil, pues esta etapa se centra en evaluar y caracterizar el germoplasma disponible, para un cultivo en particular, con la finalidad de encontrar algún material con un potencial genético e incorporarlo a los programas de mejoramiento convencionales (Pritsch, 2001)

Además de ello, es importante conocer qué características hacen que un genotipo pueda adaptarse mejor en condiciones de bajo suministro de agua. Para que una característica pueda ser utilizada como criterio de selección en un programa de

mejoramiento debe cumplir una serie de requisitos, entre los cuales están: estar genéticamente correlacionado con el rendimiento de grano, que sea de alta heredabilidad y no estar asociada con bajos rendimientos en condiciones no estresantes. Además de eso, que sea posible medir la característica con rapidez, de manera más económica, confiable y preferiblemente con evaluaciones no destructivas (Banziger *et al.*, 2006). Estos requisitos responden a la necesidad de evaluar un gran número de individuos de manera precisa, a fin de que puedan ser utilizados como progenitores para el desarrollo de poblaciones básicas para los programas de mejoramiento genético que den origen a nuevas variedades.

En este sentido, se plantea la utilización de características morfológicas, fenológicas, fisiológicas y agronómicas para la evaluación de germoplasma de caraota a fin de identificar genotipos tolerantes al déficit hídrico, útiles para los programas nacionales de mejoramiento genético. De esta manera, con el desarrollo de nuevas y mejores variedades se podrá mantener una producción sostenible, de cara a los nuevos desafíos planteados por el cambio climático, además de aumentar la utilización de los recursos genéticos disponibles en el cultivo.

OBJETIVO GENERAL

Identificar genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) tolerantes al déficit hídrico mediante características morfo-fisiológicas y agronómicas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a. Evaluar en campo germoplasma de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo la aplicación de tratamientos hídricos contrastantes para la identificación de genotipos tolerantes considerando características morfológicas, fisiológicas y agronómicas.

b. Evaluar en condiciones de invernadero germoplasma de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo la condición de déficit hídrico severo para la identificación de genotipos tolerantes considerando características morfológicas y fisiológicas.

c. Identificar características morfo-fisiológicas y agronómicas útiles para la evaluación de genotipos tolerantes al déficit hídrico, a fin ser incorporadas como criterios de selección en programas de mejoramiento en caraota.

ANTECEDENTES

GENERALIDADES DEL CULTIVO DE CARAOTA

La caraota (*Phaseolus vulgaris* L.; $2n = 2x = 22$) es la leguminosa alimenticia más importante para el consumo humano directo, ya que representa el 50% del grano de leguminosas consumido en el mundo. Se produce en diversos sistemas de cultivo y ambientes, lo que hace de la caraota, una especie cosmopolita. La caraota es consumida principalmente como grano seco (maduro), grano verde o grano verde en vaina. Cuando es consumido como semilla pueden ser una importante fuente de hierro, fósforo, magnesio, manganeso y en menor grado zinc, cobre y calcio. Además contiene el 22% del peso de la semilla de proteína, que complementa los cereales de más de medio billón de personas principalmente en África y Latinoamérica (Mayor, 2010).

La producción mundial no puede ser calculada con certeza debido a la confusión con otras leguminosas en algunos de los datos, pero se ubica entre 11 y 12 millones de toneladas, siendo América Latina la región de mayor producción de leguminosas, representando cerca del 50% del volumen mundial, siendo Brasil, México y Estados Unidos los tres grandes productores, seguido por África con el 25% (Beebe *et al.*, 2013).

En cuanto a los rendimientos en caraota, se ha logrado obtener 4 ton. ha^{-1} en biotipos arbustivos bajo ensayos experimentales, mientras que para biotipos trepadores se han alcanzado 6 ton. ha^{-1} bajo sistemas de tutorados. En condiciones comerciales, como es de esperar, los rendimientos están muy por debajo de los rendimientos experimentales. En los países de América Latina, los promedios nacionales se ubican entre 600 y 950 kg. ha^{-1} , con una tendencia a largo plazo de incrementar (Beebe *et al.*, 2013)

En países con agricultura tecnificada, los rendimientos son más altos que en el trópico y los países en desarrollo. En Estados Unidos, por ejemplo, el promedio de rendimiento en la década pasada fue de 1,64 a 1,96 $ton.ha^{-1}$ (Beebe *et al.*, 2013). Similarmente, el promedio de rendimiento en Argentina y Colombia son cerca de 1,2 $ton.ha^{-1}$ y en Brasil, bajo un manejo intensivo y con riego, el promedio de rendimiento alcanza 1,8 $ton.ha^{-1}$. Aunque muy por encima de los rendimientos que en la mayoría de los países en desarrollo, éstos siguen siendo hasta 3 $ton.ha^{-1}$ por debajo del potencial de rendimiento de la cosecha (Beebe *et al.*, 2013).

En Venezuela, la superficie cosechada para el año 2015 fue de 11.969 ha con un rendimiento promedio de 708 $kg.ha^{-1}$ y un consumo *per capita* de 2,5 kg (FEDEAGRO, 2017). Considerando que la población nacional para ese mismo año fue de 30.405.000 (INE, 2015), la producción *per capita* del país fue de 0,28 kg, evidenciándose un gran déficit en la producción de este rubro.

a. Origen y Domesticación

Fue solo hasta finales del siglo XIX cuando los científicos aceptaron que el origen del “frijol común” o caraota se remontaba al Nuevo Mundo. Con base en las primeras observaciones realizadas sobre los restos arqueológicos en el Perú y posteriormente en el suroeste de los Estados Unidos, se pensó que la caraota se había originado en las Américas. Después de los descubrimientos arqueológicos iniciales de Reiss y Stübel en Ancón (Perú), varios restos de caraota se han descubierto, no sólo en los Andes sino también en América Central y Norte América. Estos restos consistían en semillas, fragmentos de vaina e incluso plantas completas. Varios de los hallazgos arqueológicos son fenotípicamente similares a los cultivares actuales localizados en las mismas áreas (Mayor, 2010).

Phaseolus vulgaris L. es una de las cinco especies del género *Phaseolus* domesticadas que también incluye: *P. dumosus* (Macfady), *P. coccineus* (Linneo), *P. acutifolius* (Gray), *P. lunatus* (Linneo). De éstas, la caraota es la más importante por su alto valor

nutritivo para el consumo humano y amplia aceptación en diversas culturas (Gepts y Debouck, 1991).

En *Phaseolus vulgaris* L. se denominaron dos grandes acervos genéticos: mesoamericano y andino, diferenciados por variaciones en la proteína de reserva de la semilla faseolina, en características morfológicas y moleculares. Estos acervos fueron divididos en seis razas, donde el acervo andino se constituyó por las razas Nueva Granada, Chile y Perú, y el acervo mesoamericano por las razas Durango, Jalisco y Mesoamérica. Desde la domesticación de *Phaseolus vulgaris* L. en América central y México, se ha extendido esta especie a otras zonas de América, y posteriormente a Europa, África, Asia y Oceanía (Mayor, 2010).

b. Problemas de producción

La producción de caraota en América Latina es afectada por muchos factores edáficos, climáticos y bióticos. Sin embargo, los principales factores responsables de los bajos rendimientos son la alta presión de enfermedades e insectos, la sequía, la baja densidad de siembra (para evitar la alta presión de enfermedades) y la incapacidad económica o renuencia del agricultor a usar insumos (Pastor-Corrales y Schwartz, 1994). Para el caso de Venezuela, Pérez, *et al.* (2013) mencionan otros factores como los bajos niveles tecnológicos y la poca disponibilidad de semilla de calidad de cultivares mejorados genéticamente, adaptados tanto a las condiciones agroecológicas como socioeconómicas.

A nivel mundial el impacto de la sequía y el cambio climático sobre el rendimiento de los cultivos y la producción de alimentos, ha sido centro de estudio en muchas especies. El efecto que tiene la sequía sobre la caraota depende de la etapa de desarrollo, tipo y duración del estrés. En caraota, la mayor sensibilidad a condiciones de sequía ocurre durante la etapa reproductiva, desde prefloración, hasta llenado de vainas, debido al incremento en la demanda de asimilados por las estructuras reproductivas (Mayor, 2010). El estrés por sequía puede causar reducción en el

rendimiento, biomasa, número de semillas y peso de 100 semillas hasta en un 60% (Polania *et al.*, 2012).

TOLERANCIA AL DÉFICIT HÍDRICO

La tolerancia al déficit hídrico se define como la habilidad de las plantas cultivadas para crecer y rendir satisfactoriamente en áreas sujetas a períodos de déficit hídrico (Moyeja, 1997). Se pueden encontrar diversos mecanismos de tolerancia que pueden estar ligados a características morfológicas, o a respuestas fisiológicas. Algunos de estos mecanismos descritos por Mayor (2010) en caraota son los siguientes:

a. Escape a la sequía

El escape es definido como una estrategia que consiste principalmente en acoplar el ciclo biológico a los meses con mayor disponibilidad de agua (Medrano *et al.*, 2007). El hecho de que una planta tenga dentro de su ciclo fenológico una madurez temprana o tardía, puede permitirle tolerar el estrés hídrico, y completar totalmente su ciclo fenológico (Mayor, 2010).

Madurez temprana o precocidad: Cuando el cultivo de caraota empieza su ciclo fenológico con una cantidad de agua substancial para su normal germinación, y a medida que pasa el tiempo el factor agua empieza a disminuir rápidamente, la planta que tenga la capacidad de madurar apresuradamente podrá aprovechar el agua disponible antes de que se agote totalmente, logrando cumplir con su total desarrollo.

Investigadores como Rosales *et al.* (2000), han reportado que no existe una variación notable en el número de días en las etapas de prefloración y floración, cuando las condiciones de estrés no son tan severas en las etapas de prefloración y floración; sin embargo a medida que se incrementan las condiciones de sequía existe un adelanto proporcional en la floración de las líneas sometidas a esta condición, lo que puede estar relacionado con la capacidad de algunos genotipos para modificar el inicio de la floración en respuesta a la disponibilidad de humedad, esto por supuesto les permite

reducir el efecto negativo de la sequía en el momento de la floración. En este sentido Rodríguez *et al.* (2009) observaron un adelanto en los días a floración y madurez de cosecha en un total de 88 genotipos estudiados, al analizar el comportamiento de éstos en las condiciones de sequía y de riego.

Madurez tardía o recuperación: Este mecanismo es provechoso cuando al inicio o mitad del ciclo fenológico hay una disminución del agua, pero es seguido de un momento de bajo estrés o buena humedad, lo que permite que la planta pueda recuperarse y completar su ciclo fenológico normalmente.

b. Evasión a la sequía

Las plantas soportan periodos de déficit de precipitación manteniendo un alto potencial hídrico. Se debe puntualizar que las plantas con este mecanismo, no evitan la sequía, sino evitan la deshidratación de los tejidos, como por ejemplo, a través de un mayor desarrollo de raíces y modificaciones en la hoja.

Profundización de las raíces: Un sistema radical vigoroso es importante para mantener la absorción de agua en suelos secos como característica de adaptación (Polania *et al.*, 2012). Las raíces profundas y extensas en los perfiles bajos del suelo son fundamentales para el buen comportamiento de los cultivos en limitaciones de suministro de agua siempre y cuando exista agua disponible en perfiles profundos del suelo. Los sistemas radiculares superficiales, en los primeros 20 cm son eficientes en la absorción de nutrientes, mientras que un sistema radical profundo favorece la absorción de agua y por ende sus posibilidades de evadir periodos de déficit hídrico.

Existen diferentes métodos para evaluar raíces, como excavaciones directas en campo, sub-muestreos en campo, potes, sistemas hidropónicos y columnas con suelo; algunos de estos métodos como los directos en campo suelen ser muy costosos y con alta demanda de mano de obra. Tales metodologías permiten cuantificar el vigor y la profundización del sistema radical en términos de biomasa y longitud y la distribución de estas a través del perfil del suelo (Polania *et al.*, 2009)

Modificaciones en la hoja: La reducción en el área total de la hoja, permite que haya una reducción en la pérdida de agua; no obstante, la planta tendría una menor área para realizar fotosíntesis lo cual puede ser una desventaja, sin embargo, en muchas ocasiones es compensada con un grosor de la hoja mayor y mayor cantidad de clorofila (Mayor, 2010).

La apertura de los estomas normalmente varía como respuesta a cambios en la intensidad de la luz, déficit de saturación de vapor de agua del aire y la disponibilidad de humedad del suelo; con este cambio en el tamaño de apertura de los estomas, las tasas de fotosíntesis y la transpiración pueden variar, debido a que el tamaño de estos poros proporciona una resistencia a la entrada de CO_2 y O_2 de la hoja. El inverso de esta resistencia se puede calcular como la conductancia de estos dos gases a través de la hoja. Algunas investigaciones han sugerido que la respuesta a la sequía está asociada con evitar la deshidratación por medio del cierre de estomas, al encontrar considerables diferencias genótípicas en transpiración; por lo tanto, el uso de la conductancia estomática puede ser criterio útil en la evaluación de materiales más eficiente en el uso de agua (Khan *et al.* 2007).

Por otro lado, el tipo y cantidad de pigmentos presentes, mayor cantidad de ceras epicuticulares y/o tricomas permite que haya mayor reflectancia, lo cual disminuye la energía absorbida por la hoja y reduce la temperatura, impidiendo la pérdida de agua (Mayor, 2010). Una temperatura del follaje relativamente baja, bajo condiciones de déficit hídrico, podría indicar mejor capacidad de tomar agua y mantener un estado hídrico relativamente mejor (Polania, 2011). La temperatura del follaje refleja la interacción del continuo planta, suelo y atmosfera. Es por ello, que el uso de termómetros infrarrojos se ha popularizado debido a que es un método eficiente por ser rápido, no destructivo y altamente eficiente. Por tales razones, la depresión de temperatura del follaje es bastante útil como indicador de buen rendimiento en condiciones de estrés por sequía. (Feng *et al.*, 2009).

c. Tolerancia a la sequía

Todos los mecanismos anteriores ayudan a la planta de caraota a no perder y/o utilizar mejor el agua, es decir, mantener todas sus funcionalidades fisiológicas y de crecimiento en presencia de agua; sin embargo, en algunas condiciones el estrés hídrico aumenta de tal manera que puede disminuir el potencial hídrico de la planta, por tal razón la planta también puede usar otros mecanismos que le permitan continuar con sus procesos fisiológicos y metabólicos, entre ellos el mantenimiento del turgor a través del ajuste osmótico (Mayor, 2010).

En *Phaseolus vulgaris* L. se ha detectado la acumulación de ABA y prolina como consecuencia de situaciones de estrés por sequía. La acumulación de prolina y de iones NO_3^- y NH_4^+ puede contribuir al ajuste osmótico (Moyeja, 1997).

d. Recuperación

Este mecanismo de resistencia a la sequía es reportado por Acquah (2007) junto con los tres mecanismos señalados anteriormente. Según este autor, este mecanismo de resistencia es expresado cuando un genotipo tiene la capacidad de rebrotar o reanudar su desarrollo fenológico después del periodo de sequía. Variables que están asociadas a esta recuperación son el vigor en estado vegetativo y un ciclo de crecimiento largo.

PROGRAMAS DE MEJORAMIENTO PARA TOLERANCIA A DÉFICIT HÍDRICO

Las metodologías de selección consisten en la evaluación de genotipos bajo tratamientos hídricos contrastantes y la utilización de características morfo-fisiológicas de raíz, vigor, eficiencia del uso de agua, fenología y movilización de foto-asimilados como criterios de selección. Estas variables han mostrado correlación significativa y positiva con el rendimiento bajo condiciones de déficit hídrico terminal y además son de fácil determinación, bajo costo y por lo tanto presentan un gran

potencial para ser usadas como criterios de selección en los programas de mejoramiento a adaptación a déficit hídrico en caraota (Polania, 2011).

El CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) dentro del programa del CGIAR (Consortium of International Agricultural Research Centers) tiene como una de sus líneas de investigación en caraota atender los estreses abióticos y los efectos del cambio climático evaluando materiales promisorios o líneas avanzadas en cuanto a su tolerancia al déficit hídrico (CIAT, 2016a). En ese sentido, Polania *et al.* (2012) desarrolló un protocolo para evaluación fenotípica de frijol bajo estrés por sequía, incluyendo los aspectos siguientes:

De las características morfo-fisiológicas de raíces (las cuales son evaluadas en condiciones de invernadero) recomiendan: longitud total de raíz ($m.planta^{-1}$), proporción de raíces finas (%), profundización visual de raíz a los 35 días después de siembra (cm), longitud de raíz en la profundidad del suelo 40-60 cm ($m.planta^{-1}$), longitud de raíz en la profundidad del suelo 60-75 cm ($m.planta^{-1}$).

Entre las características relacionadas con vigor, eficiencia de uso de agua, fenología y movilización de foto-asimilados (que son evaluadas bajo condiciones de campo) recomiendan: Días a floración, días a madurez fisiológica, biomasa del cultivo, índice de área foliar, índice de cosecha de vaina (peso seco de semilla en cosecha/ Peso seco de vainas en cosecha x 100), discriminación de isótopo de carbono en grano y el índice de partición a vaina (peso seco de vainas en cosecha/ Peso seco de biomasa aérea (hojas+tallos+vainas) en mitad de llenado de vainas x 100).

Otras de las recomendaciones obtenidas por los distintos programas de mejoramiento llevados por el CIAT muestran los criterios de selección para tolerancia a estrés hídrico, algunas son las siguientes (Polania, 2011):

- Genotipos más productivos, están combinando una alta movilización de foto-asimilados desde diferentes estructuras de la planta como tallo y hojas a la formación de vainas (índice de partición de vaina), con una alta movilización de éstos desde la cascara de la vaina a la formación de semilla (índice de cosecha de vaina). Para

obtener materiales más productivos es apropiado una combinación de estas características con un mayor vigor de la planta (Biomasa del cultivo)

- Para mejorar adaptación a sequía en caraota es pertinente combinar características morfo-fisiológicas tanto de raíces como de vigor y movilización, la selección por una única característica no siempre puede conllevar a una mayor producción de grano.

Algunos de los resultados obtenidos por los programas de mejoramiento para tolerancia a estrés son los reportados por Polania (2011) donde encontró que las líneas NCB 226, SER 16, SEN 56 y SEA 15 se caracterizaron por presentar una mayor producción de raíces bajo estrés por sequía, permitiéndoles una mayor transpiración, combinado con un mayor vigor de la planta y una sobresaliente tasa de movilización de foto-asimilados resultando en una alta producción de grano.

Estas líneas mostraron una sobresaliente adaptación a sequía y pueden ser incluidas como padres en el programa de mejoramiento de caraota. La línea SEA 15 sobresale por su mayor profundización de raíces, producción de raíces (longitud en m.planta⁻¹) y mayor proporción de raíces gruesas bajo estrés por sequía, mientras la línea SER 118 sobresale por sus altas tasas de movilización de foto-asimilados. En su conjunto se convierten en padres potenciales para programas de hibridación que tiendan a mejorar estas características.

GERMOPLASMA DISPONIBLE

El Banco de Germoplasma del Programa de Recursos Genéticos del CIAT conserva la colección de frijol más grande y diversa del mundo, con más de 36.000 materiales de *Phaseolus spp.* a la fecha, correspondientes a 44 taxa provenientes de 110 países. Estos materiales han sido designados a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) dentro del marco del acuerdo FAO-CGIAR y están registrados en el Sistema Multilateral de Acceso y Distribución de Beneficios del Tratado Internacional sobre Recursos Fitogenéticos (CIAT, 2016b).

Todas las accesiones resguardadas en el Banco de germoplasma del CIAT, lo cual incluyen variedades locales, mejoradas, exóticas, incluyendo aquellas identificadas con mecanismos para tolerancia a déficit hídrico pueden ser solicitadas por instituciones asociadas y ser utilizadas en los programas de mejoramiento. En el caso de tolerancia a estrés hídrico se cuentan con algunos materiales que comúnmente se utilizan como testigos referenciales, entre ellos se encuentra la BAT-85 y BAT-477 como tolerantes y la BAT-1224 como susceptible.

Adicionalmente, en Venezuela contamos con las accesiones del Banco de Germoplasma del INIA (Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas) incluyendo variedades semi-domesticadas, locales y líneas mejoradas.

ÍNDICES PARA LA EVALUACIÓN DE GENOTIPOS A SEQUÍA

El comportamiento productivo *per se* de un cultivo bajo condiciones de estrés por déficit hídrico, no es necesariamente un indicativo de su tolerancia a tal condición. Un cultivar pudiera tener un buen rendimiento en condiciones desfavorables por su buen potencial genético para rendimiento más no por poseer características que le permitan adaptarse a la condición desfavorable.

Es por esa razón, que la evaluación de la tolerancia debe realizarse contrastando el rendimiento potencial del genotipo (testigo sin déficit) con su comportamiento bajo condiciones de estrés; estudiando la disminución promedio de los rendimientos con respecto al testigo (Rodríguez *et al.*, 2009).

En ese razonamiento se han propuesto diferentes índices como indicadores de la habilidad propia de cada genotipo para tolerar el estrés hídrico, donde el cálculo del indicador incluye el comportamiento para una variable dada en condiciones de irrigación y de estrés hídrico.

Perdomo (2014) esquematiza una serie de índices utilizados en el estudio de la tolerancia al estrés por déficit hídrico, resumidos en el Cuadro 1, donde se observan

índices basados en la productividad y otros en la tolerancia frente a condiciones hídricas contrastantes.

A este respecto, Rodríguez *et al.* (2009) evaluaron 62 genotipos de caraota para tolerancia a sequía utilizando estos índices, indicando que las líneas con mayor tolerancia a la sequía (menor ISS= Índice de Susceptibilidad a Sequía), no necesariamente eran las más productoras en condiciones de sequía, pero sí las que menos reducen su rendimiento al pasar de la condición de riego a la de sequía, o viceversa.

Por esta razón se hace necesaria la combinación de criterios en el momento de realizar la selección de las mejores líneas según su comportamiento, por lo que se deben seleccionar líneas que superan la media general de rendimiento en ambas condiciones, tanto en sequía como en condiciones de humedad, y que cuenten con valores de IIS inferiores al promedio.

Así mismo, Chaveco *et al.* (2001) sugieren el empleo combinado de por lo menos un índice de cada grupo; es decir, uno relacionado con la disminución del rendimiento, y el otro relacionado con la productividad entre las dos condiciones de humedad, para así combinar el alto potencial de rendimiento con la tolerancia a la sequía, debido a que cada grupo de índices evalúan fenómenos biológicos distintos, tolerancia frente a la adaptación y la productividad.

Cuadro 1. Fórmulas para calcular los diferentes índices de sequía y la interpretación para la identificación de genotipos tolerantes a déficit hídrico.

Índice	Fórmula	Interpretación para variables que disminuye su valor por sequía	Interpretación para variables que aumenta su valor por sequía
Índice de susceptibilidad a la sequía	$ISS = \left[1 - \frac{Y_S}{Y_P}\right] / \left[1 - \frac{\overline{Y_S}}{\overline{Y_P}}\right]$	Valores bajos indican mayor tolerancia	Valores bajos indican mayor tolerancia
Índice relativo a la sequía	$RDI = \left[\frac{Y_S}{Y_P}\right] / \left[\frac{\overline{Y_S}}{\overline{Y_P}}\right]$	Mayor a 1 indica tolerancia, Menor a 1 indica susceptibilidad	Menor a 1 indica tolerancia, Mayor a 1 indica susceptibilidad
Índice de Tolerancia	$TOL = Y_P - Y_S$	Valores bajos indican mayor tolerancia	Valores bajos indican mayor tolerancia
Índice de la Media Aritmética	$MP = \frac{Y_P + Y_S}{2}$	Valores altos indican mayor tolerancia	Valores bajos indican mayor tolerancia
Índice de tolerancia a estrés	$ITS = \frac{Y_P * Y_S}{\overline{Y_P}^2}$	Valores altos indican mayor tolerancia	Valores bajos indican mayor tolerancia
Índice de la media geométrica	$GMP = \sqrt{(Y_P)(Y_S)}$	Valores altos indican mayor tolerancia	Valores bajos indican mayor tolerancia
Índice de la media armónica	$MH = 2 \frac{(Y_P)(Y_S)}{Y_P + Y_S}$	Valores altos indican mayor tolerancia	Valores bajos indican mayor tolerancia

Fuente: Perdomo (2014)

Donde, Y_S = valor obtenido bajo condiciones de estrés hídrico, Y_P = valor obtenido bajo condiciones de irrigación, $\overline{Y_S}$ y $\overline{Y_P}$ = Promedio de los valores experimentales de todos los genotipos creciendo bajo condiciones de estrés y sin estrés, respectivamente y Y_P^2 = Promedio de los valores experimentales de todos los genotipos creciendo bajo condiciones de irrigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

I) EVALUACIÓN EN CAMPO

a. Material Vegetal

Se evaluaron 21 cultivares de caraota (*P. vulgaris* L.), entre locales y mejorados (Cuadro 2). Los cultivares locales se encontraron en el Banco de Germoplasma de la Unidad de Conservación de Recursos Fitogenéticos (UCRFG) del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA–CENIAP) y en el Banco de Germoplasma del Instituto de Genética de la FAGRO-UCV, ambos ubicados en Maracay. Los cultivares mejorados corresponden a líneas avanzadas del Programa de Mejoramiento Genético del INIA-CENIAP y de la FAGRO-UCV; así como, a las variedades comerciales más sembradas en Venezuela.

Estos cultivares de caraota fueron seleccionados, principalmente, por su buena adaptación y rendimiento; algunos de ellos con buen comportamiento ante el ataque de patógenos como el hongo *Macrophomina phaseolina*, muy común cuando se presentan períodos de déficit hídrico (Mayor, 2010); otros por su buena apariencia en campo en momentos de déficit hídrico (Inv. Delis Pérez, comunicación personal), en siembras de renovación de semilla del UCRFG del INIA–CENIAP.

a. Ubicación

El ensayo fue realizado en el Campo Experimental del Instituto de Agronomía de la Facultad de Agronomía, UCV, durante la época seca. Los parámetros climáticos diarios tales como: precipitación diaria, temperatura mínima y máxima, humedad relativa y evaporación potencial fueron tomados de la estación climática de la Facultad de Agronomía, UCV.

a. Manejo Agronómico

Preparación del suelo: Se realizaron cuatro pases de rastra y se utilizó una surcadora para la preparación de los camellones.

Cuadro 2. Identificación y pedigrí de 21 accesiones de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) utilizadas en la evaluación en campo para tolerancia a la sequía.

#	Entrada	Pedigrí	Tipo de Cultivar
1	‘Tacarigua’	Ven 44	
2	‘Manuare’	BAT-304	Variedad Comercial
3	‘Tiziú’	Linea Brasileira	
4	Línea 13	Selección 13 (Gen 19)	Línea Avanzada INIA
5	UCV- Línea 16	XAN154 x MEM3031013/27F2:7/1/MS/7	
6	UCV-56	XAN154 x MEM3031013/56F2:7	Líneas Avanzadas UCV
7	UCV-88	XAN154 x MEM3031013/88F2:7	
8	UCV-100	XAN154 x MEM3031013/100F2:7	
9	I-1997	MGM-01-98-022	
10	I-2011	DP-02-98-008	
11	I-2019	MGM-02-99-006	
12	I-2041	MEM-01-00-006	
13	I-2155	MEM-03-01-14	
14	I-2216	MEM-03-02-004 05-767	Variedades Locales
15	I-2218	MEM-03-02-016	
16	I-2363	MGM-10-02-097	
17	I-2368	MGM-10-02-102	
18	I-2581	DP-06-06-119	
19	I-2583	DP-06-06-121	
20	I-2592	NY-01-06-04	
21	I-2494	DON-12-06-010	Semi Domesticada

Fertilización: Siguiendo las recomendaciones, para el cultivo de caraota, del análisis de suelo del campo experimental del Instituto de Agronomía disponible, al momento de la siembra se aplicó fertilizante de fórmula completa 10-20-20 a razón de 300 kg ha⁻¹.

Control de malezas: Al momento de la siembra, se aplicó Pendimetalin (Nombre comercial Prowl) como herbicida pre-emergente, en dosis de 3 Lha⁻¹. Antes de la floración se aplicaron los herbicidas post-emergentes fluazifob-p butil (Nombre comercial: H1 2000), y Fomesafen (Nombre comercial: Flex) en dosis de 2 Lha⁻¹ y 1 Lha⁻¹, respectivamente.

Control de insectos plagas y enfermedades: Fue necesaria la aplicación de insecticida Mercamil para el control de salta-hojas o lorito verde (*Empoasca krameni*) a dosis de 1 Lha⁻¹ a los 20 y 30 dds.

b. Diseño experimental

Se realizaron dos ensayos con niveles de suministro de agua diferentes denominados ensayos de Riego y Sequía. En cada ensayo se estableció un diseño de experimentos de bloques aleatorios con tres repeticiones. La unidad experimental fue de una hilera de 5 m de longitud a una distancia de 60 cm entre hileras y 20 cm entre plantas (5 semillas por metro lineal).

Ambos ensayos (riego y sequía) fueron regados (riego por gravedad) dos días antes de la siembra, 7, 14, 21 y 28 días después de la emergencia donde se comenzaron a aplicar los niveles diferenciales de riego según el ensayo.

En el ensayo con Riego se siguió aplicando riegos cada 7 días, mientras que para el ensayo de Sequía no se aplicaron riegos durante un periodo de 25 días, cuando se observaron síntomas de estrés, como quemado del tejido foliar (fogueo) y orientación de las hojas paralelas a los rayos solares (Rodríguez, 1992; Riveiro, 2012). A partir de allí, se reincorporó de nuevo el riego semanal hasta madurez fisiológica.

c. Variables evaluadas

Contenido de agua en el suelo. Se realizó la determinación periódica del contenido de humedad del suelo a partir del día de inicio del periodo de estrés por déficit hídrico, el cual fue el día siguiente después del último riego aplicado a los 28dds. A partir de ese momento, con un barreno, se tomaron tres muestras de suelo por repetición en la hilera de siembra en los estratos de 0-20cm, con una periodicidad de tres días, hasta la recuperación del riego. El contenido de humedad del suelo se determinó mediante el método gravimétrico. Adicionalmente, se determinó el contenido de humedad del suelo en el ensayo con riego, donde, las muestras fueron tomadas al día siguiente al último riego, y el día antes del siguiente riego en el periodo comprendido de 28dds hasta la culminación del déficit hídrico en el ensayo de sequía.

Emergencia (%) a los 15 días después de la siembra (dds): Se contó el número de plantas a los 15 dds en cada parcela y repetición, y se calculó el porcentaje de plantas establecidas con respecto al número de semillas sembradas.

Variables Morfológicas:

Plantas Erectas (%): Se evaluó en la etapa de floración contando el número de plantas por unidad experimental correspondientes al hábito de crecimiento tipo II-a, según descriptores del IPGRI (2001) para *Phaseolus vulgaris* L.

Vigor: Según la apariencia general de las plantas en cada parcela, se les clasificó en una escala de 1 a 5, considerándose 1 menos vigorosa y 5 más vigorosa. La evaluación se realizó en la etapa de floración, a los 45 dds.

Altura de planta: Se midió en centímetros, a los 45dds, en 10 plantas tomadas al azar por parcela experimental, desde la cicatriz de los cotiledones hasta el dosel de la planta.

Variables Fenológicas:

Grado de desarrollo: fue calculado a los 45 dds como el promedio ponderado de distintas etapas fenológicas para cada genotipo en condiciones de Riego y Sequía. Las

etapas fenológicas utilizadas y los valores asignados fueron: Estado vegetativo (1), Botón floral (3), Flores (5), Frutos incipientes (7), Frutos en desarrollo (9) y Frutos grandes (11). El promedio ponderado es interpretado como un índice de desarrollo del cultivar.

Días a floración: Número de días transcurridos desde la siembra hasta el momento en el cual 50% de las plantas de la unidad experimental presentó flores abiertas.

Días a mitad de llenado de vaina: Número de días transcurridos desde la siembra hasta el momento en el cual 50% de las plantas no tenían flores, las vainas estaban verdes y se observaba la forma de las semillas en las vainas. Para el análisis de esta variable se realizó un polígono de frecuencia.

Días a madurez fisiológica: Número de días transcurridos desde la siembra hasta el momento en el cual 50% de las plantas estuvieran en madurez y las vainas abrían fácilmente cuando eran apretadas.

Días de llenado de grano: Se calculó como la diferencia entre los días a Madurez fisiológica y los días a floración.

Variables Fisiológicas:

Lectura SPAD: Fue determinado usando un medidor de clorofila de mano (SPAD-502 Plus, Minolta) no destructivo. El valor de SPAD fue medido sobre la hoja joven completamente expandida de una planta por repetición. Esta característica es expresada en unidades SPAD. Este valor indica grado de verdor y es proporcional a la cantidad de clorofila en la hoja. Las medidas se realizaron entre las 10:30 am y 1:00 pm a los 45 dds en cada ensayo.

Biomasa aérea en cosecha: se tomaron dos plantas por unidad experimental, las cuales fueron cortadas a nivel del suelo y trasladadas en una bolsa plástica a la estación de trabajo para ser procesada. Las plantas fueron separadas en sus diferentes estructuras: hojas (sin pecíolos); tallos y vainas. Las diferentes estructuras de la planta

se pusieron por separado en bolsas de papel para secado en estufa a 60°C por 2 días. Después del secado de las muestras, se registró el peso seco de cada muestra (Polania *et al.*, 2009). La determinación de la biomasa aérea en cosecha permitió calcular los siguientes índices de movilización de fotoasimilados:

Índice de cosecha (IC): para cada genotipo fue determinado como peso seco de semillas / Peso seco de biomasa aérea (hojas+tallos+vainas) en cosecha x 100.

Índice de cosecha de vaina (ICV): para cada genotipo fue determinado como peso seco de semilla en cosecha/ Peso seco de vainas en cosecha x 100.

Variables Agronómicas:

Rendimiento: Al momento de la cosecha, se contó el número total de plantas de la parcela. Se cosecharon todos los frutos, los cuales se contaron y pesaron. Seguidamente, los frutos se trillaron, y las semillas se pesaron. Además se determinó el porcentaje de humedad. De esta manera se calculó el rendimiento ajustado al 12% de humedad, y se expresó como gramos por planta (g.planta^{-1}) y luego se estimó en kg.ha^{-1} .

Componentes del rendimiento: Al momento de la cosecha, se tomaron 10 plantas al azar de cada unidad experimental, se tomaron todos sus frutos, se contaron y pesaron. Seguidamente, se trillaron y se midió la humedad de las semillas en porcentaje a fin de ajustarla al 12%. Con tales medidas se calcularon los siguientes componentes: Número promedio de vainas por planta (NVP), Número promedio de semillas por vaina (NSV) y Peso promedio de 100 semillas (P100S).

Índices de Sequía:

A excepción del índice de intensidad de sequía todos los demás índices fueron calculados para aquellas variables que mostraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para la interacción Genotipo x Ambiente en el análisis combinado.

Índice de intensidad de sequía (DII): fue calculado a través de la siguiente fórmula $DII = 1 - X_s/X_r$, donde X_s y X_r es la media de todos los genotipos bajo tratamientos de sequía (s) y riego (r) respectivamente.

Índice relativo a la sequía (RDI): fue calculado a través de la siguiente fórmula $RDI = (Y_s/Y_r)/(X_s/X_r)$ donde Y_s y Y_r es valor obtenido por genotipo en condiciones de sequía (s) y riego (r), respectivamente y X_s y X_r es la media de todos los genotipos bajo condiciones de sequía (s) y riego (r) respectivamente.

Índice de la media armónica (MH): fue calculado a través de la siguiente fórmula $MH = 2 \frac{(Y_p)(Y_s)}{Y_p + Y_s}$

Índice de la Media geométrica (GM): la GM fue determinada por la fórmula $MG = (Y_r \times Y_s)^{1/2}$. Donde Y_r es el valor bajo condiciones de riego y Y_s el valor para condiciones de sequía de una misma variable.

Índice de la Media aritmética (MP): es el rendimiento promedio de cada genotipo bajo condiciones de riego óptimo (Y_r) y condiciones de estrés por sequía (Y_s).

d. Análisis estadístico

Para las variables cualitativas se realizó un análisis descriptivo que incluyó frecuencia por categoría. Para las variables cuantitativas, se realizaron los cálculos básicos de estadística descriptiva a través de valores de mínimo, máximo, media, desviación estándar, asimetría, Kurtosis y Normalidad para la comprobación de la normalidad de la distribución de los datos. Para cada ensayo y variable que cumplió con los supuestos se realizó un análisis de varianza (ANAVAR), usando el paquete estadístico InfoStat versión 2016 bajo el diseño de bloques al azar como se describe a continuación:

$$\text{Modelo lineal aditivo: } Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

Y_{ij} : Observación del i-ésimo genotipo en el j-ésimo bloque,

μ : Media general

τ_i : Efecto del i-ésimo genotipo

β_j : Efecto del j-ésimo bloque

ε_{ij} : Efecto aleatorio en el i-ésimo tratamiento y en el j-ésimo bloque que mide el error experimental.

Hipótesis

Para tratamientos

$$H_0: \tau_i = 0$$

$$H_a: \tau_i \neq 0$$

Para bloques

$$H_0: \sigma_\beta^2 = 0$$

$$H_a: \sigma_\beta^2 \neq 0$$

El análisis de la varianza realizado para cada ensayo permitió evaluar la significación estadística de las fuentes de variación Genotipos y Bloques para cada variable en estudio, cuyas esperanzas de los cuadrados medios se presentan en el siguiente cuadro:

F De V.	G De l.	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Esperanza de los cuadrados medios	Prueba de F
Tratamiento: Genotipo	t - 1	$\sum_{i=1}^t Y_i^2 / r - F.C.$	SCTRAT / (t - 1)	$r \sum_{i=1}^t \tau_i^2 / (t - 1) + \sigma_e^2$	CMTRAT/ CMEE
Bloque	r - 1	$\sum_{j=1}^r Y_j^2 / t - F.C.$	SCBLOQ / (r - 1)	$\tau \sigma_\beta^2 + \sigma_e^2$	CMBLOQ/ CMEE
Error	(t - 1)(r - 1)	SCTOTAL - SCTRAT - SCBLOQ	SCEE / (t-1) (r-1)	σ_e^2	
TOTAL	rt - 1	$\sum_{i=1}^t Y_{ij}^2 - F.C.$			

Donde F.C. = $(\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r Y_{ij})^2 / rt$

Para determinar el efecto del riego sobre los genotipos se siguió la metodología propuesta por Gómez y Gómez (1984) basado en el análisis de datos de serie de experimentos. Para ello, se verificó previamente el cumplimiento de la homogeneidad

de las varianzas a partir de la razón entre el máximo y el mínimo cuadrado medio de los residuales, cuyo resultado para el cumplimiento de la homogeneidad de la varianza debe ser igual o menor a 4. Verificado la homogeneidad de la varianza, se procedió a realizar un análisis de varianza combinado bajo el siguiente modelo estadístico:

$$\text{Modelo lineal aditivo: } Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \rho_j + (\tau\rho)_{ij} + \beta_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde:

Y_{ijk} : Observación k-ésima del i-ésimo genotip y j-ésimo riego.

μ : Media general

τ_i : Efecto el i-ésimo genotipo

ρ_j : Efecto del j-ésimo riego

β_k : Efecto del k-ésimo bloque en el j-ésimo riego.

ε_{ijk} : Error experimental

Hipótesis:

Para tratamientos (genotipos)

$$H_0: \tau_i = 0$$

$$H_a: \tau_i \neq 0$$

Para bloques

$$H_0: \sigma_\beta^2 = 0$$

$$H_a: \sigma_\beta^2 \neq 0$$

Para Riego

$$H_0: \rho_j = 0$$

$$H_a: \rho_j \neq 0$$

Para la Interacción

$$H_0: (\tau\rho)_{ij} = 0$$

$$H_a: (\tau\rho)_{ij} \neq 0$$

El análisis de la varianza combinado permitió evaluar la significación estadística de las fuentes de variación (riego, genotipos y su interacción), cuyos cuadrados medios esperados se presentan en el siguiente cuadro:

F. de V.	G. L.	Cuadrados Medios Esperados	Prueba de F
Riego (Ambiente)	a-1	$\sigma_e^2 + rt \sum_{i=1}^p \rho_j^2 / (a-1)$	CMRIEGO/CMEE
Bloques (Repetición en riego)	a(r-1)	$\sigma_e^2 + at\sigma_\beta^2$	CMBLOQ/CMEE
Genotipos (Tratamiento)	t-1	$\sigma_e^2 + ar \sum_{i=1}^t \tau_i^2 / (t-1)$	CMTRAT/CMEE
Genotipo x Riego	(t-1)(a-1)	$\sigma_e^2 + r \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^p (\tau\rho)_{ij}^2 / (t-1)(a-1)$	CMINTER/CMEE
Error Experimental	a(r-1)(t-1)	σ_e^2	
Total	atr-1		

Para aquellas variables donde se evidenció significancia para la interacción genotipo x riego, se calcularon los índices de sequía mencionados anteriormente. Tales índices fueron sujetos a un análisis de la varianza y para aquellos donde hubo diferencias significativas entre genotipos se realizó una prueba de medias de Duncan a fin de identificar los genotipos superiores, es decir, tolerantes.

II) EVALUACIÓN EN INVERNADERO

a. Material Vegetal

Se evaluaron los mismos genotipos utilizados en el ensayo de campo a excepción de los cultivares Línea 13 (Gen 9) e I-2494, por falta de disponibilidad de semillas, para un total de 19 genotipos (Cuadro 2). Los distintos cultivares se encontraron en la Unidad de Conservación de Recursos Fito-genéticos (UCRFG) del INIA-CENIAP y en el Banco de Germoplasma de la FAGRO-UCV, Maracay.

b. Ubicación

El ensayo fue realizado en el Instituto de Agronomía de la Facultad de Agronomía, UCV, bajo condiciones de invernadero, donde se aplicó la condición de déficit hídrico severo.

El ensayo fue establecido en bolsas de polietileno con una capacidad de dos kg. Como sustrato se utilizó tierra abonada, arena de río lavada previamente tamizada y esterilizada, y humus de lombriz en una proporción 3:2:1 en base a volumen. No se aplicó ningún tipo de fertilización adicional.

c. Aplicación de la condición de estrés por déficit hídrico

Durante los primeros 28 días del cultivo, se mantuvo el suelo irrigado al 100% de la Capacidad de campo (CC). A partir de ese momento, el riego fue suspendido y se anotó como día 0 del período de estrés por déficit hídrico, hasta un total de 14 días, fecha en la cual se levantó el ensayo.

d. Diseño experimental

El diseño de experimentos fue bloques aleatorios con tres repeticiones. Cada unidad experimental fue de una bolsa con dos plantas.

e. Variables fisiológicas a evaluar

Área foliar (AF): Se tomó una hoja del dosel medio por cada repetición para cada genotipo. Cada hoja fue fotografiada y luego analizada con el programa ImageJ para determinar el área foliar en cm^2 . El AF fue determinado a los 7 y 14 días del período del déficit hídrico.

Área foliar específica (AFE): Es definida como la razón entre el área foliar y el peso seco de la hoja ($\text{AEF} = \text{área (cm}^2) / \text{peso seco (mg)}$); es un índice de espesor (Ascencio, 1972; Ligarreto, 2013). Para ello se tomó una hoja del dosel medio por cada repetición para cada genotipo. Cada hoja fue fotografiada y luego analizada con el programa ImageJ para determinar el área foliar. Posteriormente, se secaron en estufa a 60°C durante 48h y luego fueron pesadas. El AFE fue determinado a los 0, 7 y 14 días del período del déficit hídrico.

Lectura SPAD: Fue determinado usando un medidor de clorofila de mano (SPAD-502 Plus, Minolta) no destructivo. El valor de SPAD fue medido sobre la hoja joven completamente expandida de una planta por repetición. Esta característica es expresada en unidades SPAD. Este valor indica grado de verdor y es proporcional a la cantidad de clorofila en la hoja. Las medidas se realizaron entre las 10:30 am y 1:00 pm durante el ciclo de déficit hídrico a los 0, 7 y 14 días.

Temperatura de la hoja. Fue realizada con el equipo CI-340 Photosynthesis System entre las 09:00 am y 11:00 am a los 0, 7 y 14 días del período del déficit hídrico.

Biomasa aérea. Al final del período del déficit hídrico, a los 42 dds, se procedió a cosechar cada planta de forma individual. Seguidamente se realizaron la separación de órganos (tallos, hoja y partes reproductivas), luego en cada órgano se realizó la

separación de tejido verde y tejido muerto. Posteriormente, las muestras se secaron en estufa a 60°C durante 48h y luego fueron pesadas a fin de determinar el % de biomasa viva.

f. Análisis estadístico

Se realizaron los cálculos básicos de estadística descriptiva a través de valores de mínimo, máximo, media, desviación estándar, asimetría, Kurtosis y Normalidad para la comprobación de la normalidad de la distribución de los datos. Para las variables Biomasa total y Proporción de biomasa viva se realizaron análisis de la varianza (ANAVAR), usando el paquete estadístico InfoStat versión 2016 bajo el diseño de bloques al azar como se describe a continuación:

$$\text{Modelo lineal aditivo: } Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

Y_{ij} : Observación del i-ésimo genotipo en el j-ésimo bloque,

μ : Media general

τ_i : Efecto del i-ésimo genotipo

β_j : Efecto del j-ésimo bloque

ε_{ij} : Efecto aleatorio en el i-ésimo tratamiento y en el j-ésimo bloque que mide el error experimental.

Hipótesis:

Para tratamientos

$$H_0: \tau_i = 0$$

$$H_a: \tau_i \neq 0$$

Para bloques

$$H_0: \sigma_\beta^2 = 0$$

$$H_a: \sigma_\beta^2 \neq 0$$

El análisis de la varianza realizado para cada ensayo permitió evaluar la significación estadística de las fuentes de variación Genotipos y Bloques para cada variable en

estudio, cuyas esperanzas de los cuadrados medios se presentan en el siguiente cuadro:

F. De V.	G De l.	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Esperanza de los cuadrados medios	Prueba de F
tratamiento Genotipo	t - 1	$\sum_{i=1}^t Y_i^2 / r - F.C.$	SCTRAT / (t - 1)	$r \sum_{i=1}^t \tau_i^2 / (t - 1) + \sigma_e^2$	CMTRAT/ CMEE
Bloque	r - 1	$\sum_{j=1}^r Y_j^2 / t - F.C.$	SCBLOQ / (r - 1)	$\tau\sigma_\beta^2 + \sigma_e^2$	CMBLOQ/ CMEE
Error	(t - 1)(r - 1)	SCTOTAL - SCTRAT - SCBLOQ	SCEE / (t-1) (r-1)	σ_e^2	
TOTAL	r t - 1	$\sum_{i=1}^t Y_{ij}^2 - F.C.$			

Donde F.C. = $(\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r Y_{ij})^2 / rt$

Para las variables que mostraron diferencias significativas entre genotipos se realizó una prueba de medias, a fin de identificar los genotipos superiores, que presenten mecanismos de tolerancia al déficit hídrico.

III) ANÁLISIS DISCRIMINANTE DE LAS VARIABLES ASOCIADAS A LA TOLERANCIA A DÉFICIT HÍDRICO

Para que una variable pueda ser utilizada como criterio de selección dentro de los programas de mejoramiento genético de caraota para tolerancia al estrés hídrico, ésta debe cumplir con los siguientes requisitos: que esté correlacionada con rendimiento, que sea de alta heredabilidad (baja interacción genotipo x ambiente) y además no debe estar asociada con bajos rendimientos en condiciones óptimas (Polania, 2011).

Considerando aquellas variables donde existieron diferencias significativas entre genotipos para cada ensayo según el análisis de la varianza se siguieron los siguientes pasos:

En primer lugar, se estimaron correlaciones entre las variables morfo-fisiológicas y agronómicas evaluadas en campo y rendimiento; para el caso de las variables fisiológicas evaluadas en invernadero, se estimaron correlaciones con la biomasa

aérea. Aquellas variables que presentaron correlaciones estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) con rendimiento o biomasa viva bajo condiciones de déficit hídrico fueron seleccionadas. En cuanto a las variables que se midieron en campo, las correlaciones con el rendimiento bajo el ensayo de riego se realizaron para determinar si las características están afectando o no la producción de grano en campo.

Igualmente se realizó un análisis multivariado, el análisis de componentes principales (ACP) a fin de identificar las variables que más explican la diversidad total observada para cada ensayo (Hidalgo, 2003).

En segundo lugar, para las variables evaluadas tanto en campo como en invernadero que presentaron una correlación significativa ($p \leq 0.05$) con rendimiento y biomasa aérea, respectivamente, se les calculó la heredabilidad en sentido amplio. La heredabilidad se define como una relación proporcional de la variación fenotípica total observada que se debe a causas genéticas (Ceballos, 1996).

Para el cálculo de heredabilidad en sentido amplio se requiere estimar la varianza genética ($\sigma^2 G$) y la varianza fenotípica ($\sigma^2 F$). La variancia genética, mide la variación debida a efectos genéticos, y la variancia fenotípica es la variación total del carácter, tanto la que se debe a efectos genéticos como a los efectos ambientales.

Esta heredabilidad es en sentido amplio debido a que tiene en el numerador una variancia que agrupa a todos los factores genéticos que afectan la expresión de un determinado carácter (Ceballos, 1996). El cálculo de heredabilidad se realiza de acuerdo a la siguiente ecuación: $h^2 = \frac{\sigma^2 G}{\sigma^2 F}$.

La estimación de la variancia genética y fenotípica se realizó a partir del análisis de la variancia para cada variable, usando la esperanza de los cuadrados medios presentados en la tabla a continuación y mediante los siguientes procedimientos:

Fuentes de Variación	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Esperanza de los cuadrados medios
Genotipos			CM 1	$\sigma_e^2 + r\sigma_{Gen}^2$
Repetición				$\sigma_e^2 + g\sigma_{Rep}^2$
Error			CM 2	σ_e^2
Total				

Dónde:

$$\sigma^2_{Genética} = \sigma_{Gen}^2 = (CM1 - CM2) / r$$

$$\sigma^2_{Ambiental} = (\sigma_e^2 / r) = (CM2 / r)$$

$$\sigma^2_{Fenotípica} = \sigma^2_{Genética} + \sigma^2_{Ambiental}$$

CM1: Cuadrado medio de genotipos; CM2: Cuadrado medio del error

Finalmente, aquellas variables que resultaron estar correlacionadas con rendimiento o biomasa viva en condiciones de sequía y a su vez presenten alta heredabilidad en sentido amplio, fueron seleccionadas y recomendadas como criterios de selección adecuados para ser utilizados en los programas de mejoramiento para tolerancia a déficit hídrico en el cultivo de caraota y a su vez fueron utilizadas para recomendar a genotipos como progenitores y/o cultivares para zonas donde la sequía es una limitante en la producción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. EVALUACIÓN EN CAMPO

I. Condiciones de sequía en campo

La relación en la distribución de datos de variables climáticas durante el crecimiento y el desarrollo del cultivo evidenciaron condiciones favorables para la evaluación de los ensayos con tratamientos hídricos contrastantes (Figura 1). Durante el ciclo de cultivo, el rango de radiación solar diario fue de $8,1 \text{ Mj.m}^{-2}$ a $23,1 \text{ Mj.m}^{-2}$. Igualmente, se registraron en promedio una temperatura mínima y máxima de $19,18$ y $33,56$ °C respectivamente y la precipitación total fue de $2,22 \text{ mm}$.

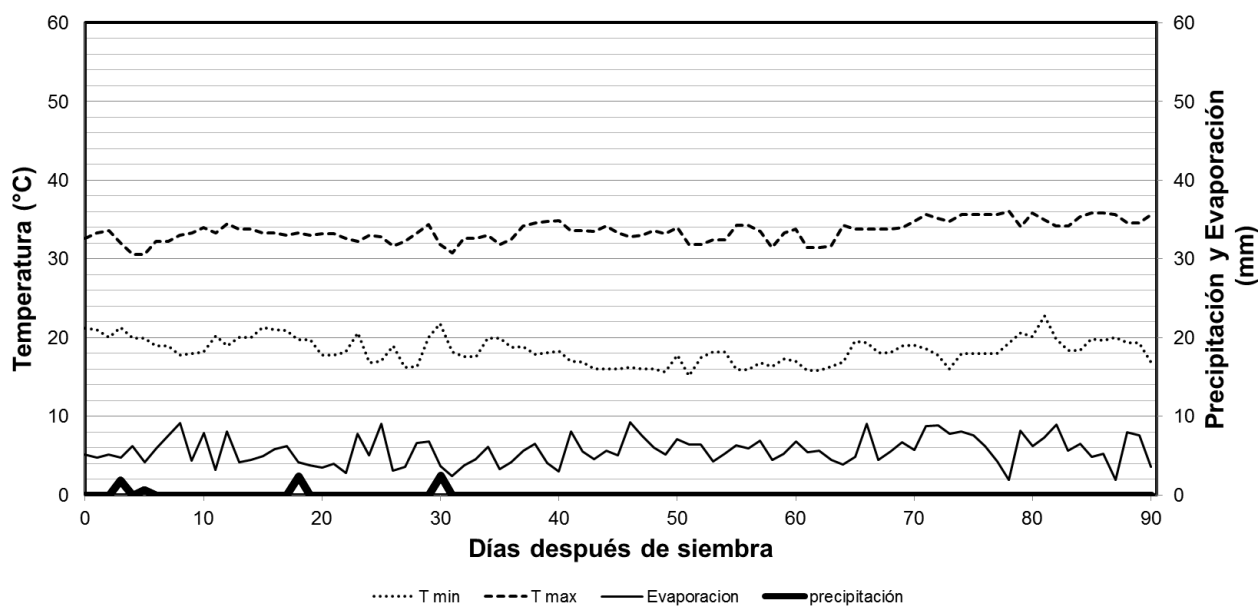


Figura 1. Temperatura mínima y máxima, Evaporación y Precipitación durante el ciclo de cultivo.

El contenido de agua en el suelo fue determinado durante la aplicación de los niveles de riego contrastantes para cada ensayo a fin de demostrar la presencia e intensidad de la sequía en el ensayo sin riego. En la Figura 2 se muestran los valores de contenido de humedad del suelo para ambos ensayos (con y sin sequía) y el momento de riego para cada uno. El periodo de sequía tuvo una duración de 25 días comenzando a

partir de la aplicación del último riego a los 28 dds hasta los 53 dds cuando se aplica nuevamente el riego para este ensayo.

La suspensión del riego desde los 28dds a los 53 dds corresponde a las etapas fenológicas de prefloración, floración e inicio de llenado de vainas, etapas fenológicas en la que distintos autores señalan una mayor sensibilidad a las condiciones de sequía debido al incremento en la demanda de asimilados por las estructuras reproductivas (Moyeja, 1997; Mayor, 2010; Polania *et al.*, 2012; Polon *et al.*, 2013; Acosta-Díaz *et al.*, 2014).

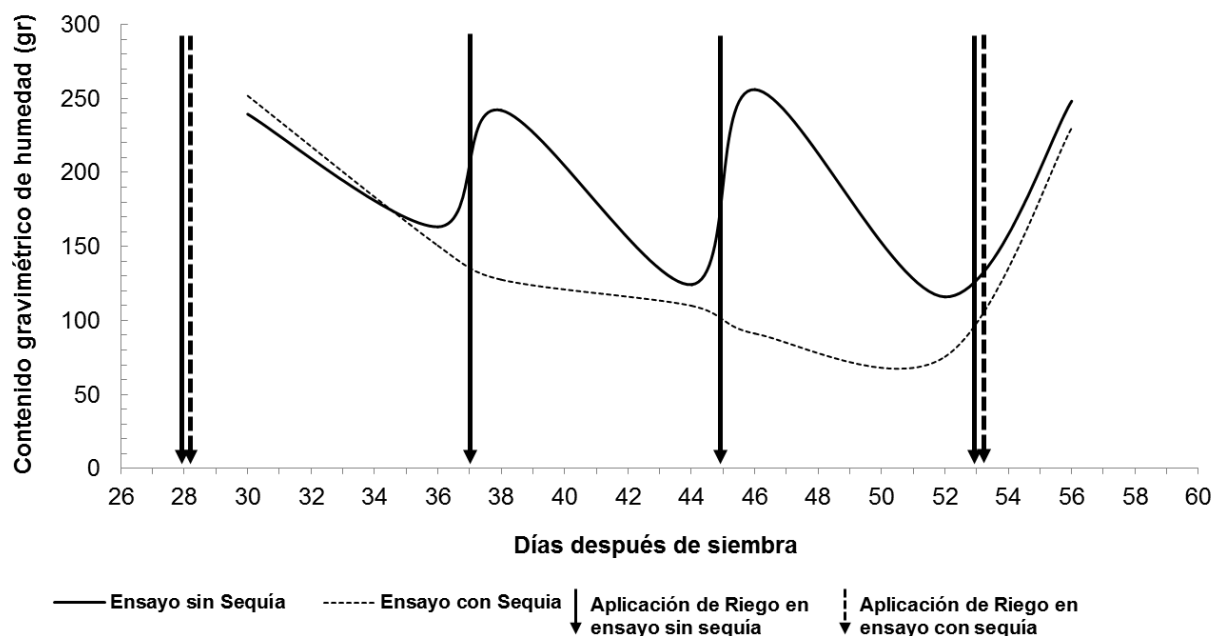
En trabajos similares realizados por, Beebe *et al.* (2008), Polania (2011), Rodríguez *et al.* (2010), Rao *et al.* (2013) y Acosta-Díaz *et al.* (2014) los ensayos de sequía fueron regados hasta los 21, 25, 26 hasta los 45 dds, respectivamente, y no se reincorporó nuevamente el riego. Otros autores como Acosta *et al.* (1999) y Polon *et al.* (2013) han evaluado la tolerancia a la sequía estableciendo ensayos con déficit hídrico en etapas vegetativas, simulando sequía de tipo intermitente con intervalos de riego suplementario mayores que los ensayos sin estrés o tomando como ensayo de sequía aquel ensayo sometido a condiciones de secano durante todo el ciclo del cultivo.

La gran diversidad de métodos en el establecimiento de ensayos con tratamientos hídricos contrastantes obedecen a que la tolerancia a la sequía es un carácter elusivo ya que depende de las interacciones particulares del ambiente donde se desarrolla el cultivo así como del momento, intensidad y duración de la sequía (Acosta *et al.*, 1999). Es por ello que la selección de genotipos para esta característica debe ser realizada bajo condiciones ambientales similares a las zonas de producción del cultivo.

En Venezuela, la producción de caraota es realizada principalmente por pequeños productores, en áreas de 0,5 a 5 ha, y la siembra suele realizarse a salida de lluvias, entre los meses de septiembre a octubre. Esta época coincide con los meses del año en los que las temperaturas nocturnas son más frescas, la humedad residual en el suelo es

alta, las precipitaciones son bajas en cuanto a cantidad, frecuencia e intensidad y la cosecha coincide con la época seca (Madriz, 2011).

Figura 2. Contenido de humedad del suelo para los ensayos con y sin sequía durante la aplicación de los tratamientos hídricos contrastantes.



Esta época de siembra es aprovechada mayormente por estos pequeños productores debido a su baja capacidad de suministrar riego suplementario al cultivo. No obstante, los efectos de cambio climático han traído como consecuencia la irregularidad en el comienzo y salida de las precipitaciones, así como su frecuencia e intensidad, afectando las condiciones ideales de humedad que se presentan a salida de lluvias para el cultivo de caraota (Madriz, 2011).

Adicionalmente, Terán y Singh (2002) han demostrado que cuando los periodos de sequía inciden principalmente durante la etapa reproductiva, es común observar una importante disminución del rendimiento o incluso la pérdida total de la producción.

Es por ello que la reincorporación del riego en el ensayo de sequía en la etapa fenológica correspondiente a llenado de vainas, se debe a la necesidad de simular las

condiciones de humedad de los productores de este cultivo en el país, así como la de evitar la pérdida total del mismo o inducir una sequía tan fuerte en la que no se observen diferencias entre los genotipos para todas las variables evaluadas.

Por otro lado, la intensidad de la sequía puede determinarse al comparar el rendimiento promedio obtenido en cada ensayo (índice de intensidad de sequía). Para el ensayo con riego el rendimiento estimado promedio fue de 1885.19 kg.ha⁻¹ mientras que para el ensayo con sequía fue de 811.73 kg.ha⁻¹, lo que equivale a una reducción del 57% del rendimiento debido a la sequía inducida en el ensayo.

Resultados similares fueron obtenidos por Acosta *et al.* (1999) quienes reportaron valores de 48% en la reducción del rendimiento al evaluar bajo condiciones de riego y sequía 20 genotipos de caraota en 3 localidades de México y Acosta-Díaz *et al.* (2014) en México obtuvieron una reducción promedio del 47% del rendimiento en condiciones de sequía terminal al evaluar 8 genotipos de caraota.

Rodríguez *et al.* (2010) evaluaron 88 genotipos bajo condiciones de riego y de secano en Cuba y obtuvieron una reducción del 20% del rendimiento. Polania (2011) evaluó 21 genotipos de caraota bajo condiciones hídricas contrastantes en Colombia y obtuvo una reducción del rendimiento del 61% y Rao *et al.* (2013) en Colombia obtuvieron una reducción del rendimiento del 31% al evaluar 36 genotipos de *Phaseolus vulgaris*, *Phaseolus acutifolius* e híbridos interespecíficos entre ambas especies bajo condiciones de riego y sequía.

Para todos los autores mencionados anteriormente fue posible la identificación de genotipos tolerantes a la sequía, demostrando que los niveles de intensidad de sequía obtenidos en este ensayo fueron satisfactorios para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

II. Establecimiento del ensayo

Durante el establecimiento del cultivo se midió el % de Emergencia a los 15 días después de siembra. El cuadro 3 muestra los valores promedios obtenidos para cada genotipo evaluado en cada ensayo. En general, los valores de % de Emergencia estuvieron en un rango de 80 a 100% con una media superior al 90% para ambos ensayos.

Estos valores indican un establecimiento adecuado para la unidad experimental establecida (25 plantas), permitiendo tener la cantidad de plantas suficientes para cada una de las variables medidas. Reyes-Matamoros *et al.* (2014) reportaron valores de 92 a 95% para la evaluación de genotipos de caraota para tolerancia a sequía, considerándolo un valor adecuado de viabilidad de la semilla.

Cuadro 3. % de Emergencia promedio a los 15 días después de siembra para cada ensayo.

Genotipo	%Emergencia 15dds		Genotipo	%Emergencia 15dds	
	Riego	Sequía		Riego	Sequía
I-1997	80	84	I-2583	100	100
I-2011	92	88	I-2592	100	100
I-2019	92	96	Línea 13	100	96
I-2041	92	92	MANUARE	100	100
I-2155	88	84	TACARIGUA	100	100
I-2216	92	80	TIZIÚ	100	100
I-2218	100	96	UCV-100	84	84
I-2363	100	100	UCV-56	100	100
I-2368	92	96	UCV-88	100	96
I-2494	84	88	UCV-Línea 16	84	96
I-2581	100	96			

III. Variables morfológicas

Las variables Vigor, Altura de planta y Plantas Erectas (%) fueron evaluadas simultáneamente a los 45 dds en cada ensayo. Para las variables Vigor y Altura de planta se obtuvieron promedios superiores en el ensayo de riego al compararlos con el ensayo de sequía. Lo contrario ocurre con Plantas Erectas (%) donde en el ensayo de riego se obtuvieron un 81.59% mientras que en el ensayo de sequía 91.43% (Cuadro 4).

Cuadro 4. Estadísticos descriptivos para las variables Altura de planta, Vigor y % de Plantas Erectas.

Variables	Ensayo	Media	Mín	Máx	Asimetría	Kurtosis	Normalidad
Altura de planta	Riego	35.64 ± 6.07	24	56	0.92	1.08	0.95
	Sequía	31.22 ± 7.37	15	51	0.17	0.04	0.98
Vigor	Riego	3.11 ± 0.66	1.8	4.4	-0.11	-0.79	0.93
	Sequía	2.77 ± 0.60	1.5	4	-0.1	-0.38	0.93
%Plantas Erectas	Riego	81.59 ± 30.33	0	100	-1.54	0.98	0.64
	Sequía	91.43 ± 20.55	20	100	-2.37	4.11	0.48

Altura de planta y Vigor

Para el ensayo de riego se obtuvieron valores promedios de Vigor de 3.11 mientras que para el ensayo de sequía 2.77. Así mismo, los valores promedios de Altura de planta fueron superiores en el ensayo de riego al compararlos con el ensayo de sequía, con valores de 35.64 y 31.22 respectivamente (Cuadro 4). Para ambas variables se observaron diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0.01$) entre los genotipos en cada uno de los ensayos (Cuadro 5). Con los valores de los cuadrados medios del error para cada ensayo se realizó la prueba de homogeneidad de varianzas de Hartley, cuyos resultados permitieron realizar el análisis combinado (Cuadro 6).

Dicho análisis mostró diferencias estadísticas altamente significativas entre los ambientes ($p < 0.01$), evidenciando el efecto de la sequía sobre las variables Vigor y

Altura de planta. No existieron diferencias significativas para la interacción Genotipo x Ambiente según los resultados de este ensayo (Cuadro 7).

Cuadro 5. Cuadrados Medios del análisis de varianza por ambiente para las variables Altura de Planta y Vigor.

FV	gl	Altura de Planta		Vigor	
		Riego	Sequía	Riego	Sequía
Bloque	2	87.3	799.19	3.02	0.26
Genotipo	20	50.37ns	46.35*	0.41*	0.72**
Error	40	27.51	21.46	0.17	0.3
Total	62				
CV (%)		14.71	14.85	14.86	17.67

* y ** indican diferencias significativas con un valor de $p < 0.05$ y $p < 0.01$, respectivamente; ns: diferencias estadísticas no significativas.

Cuadro 6. Prueba de homogeneidad de varianzas de Hartley para las variables Altura de Planta y Vigor.

Cuadrado Medio del Error	Altura de Planta		Vigor
	Riego	Sequía	
	27.51	21.46	0.17
			0.3
Prueba de Hartley	1.28		1.76

El genotipo con mayor Vigor en promedio fue UCV-88, mientras que el genotipo con menor Vigor fue la variedad local I-2494 con valores de 3.77 y 2.33 respectivamente. Cabe destacar que para el ensayo de riego los genotipos con mayor Vigor fueron UCV-56 y UCV-88 con valores de 4.13 y 3.87 respectivamente, mientras que para el ensayo de sequía el genotipo con mayor valor fue UCV-88 con una media de 3.83 (Cuadro 8).

Es importante señalar que el genotipo UCV-88 presenta una característica particular que se observó tanto en el ensayo de riego como el ensayo de sequía. Además de su estructura compacta y su alto verdor, presenta una alta rusticidad debido al grosor en

la base del tallo confiriéndole una alta resistencia al acame (Salinas-Pérez et al., 2008).

Cuadro 7. Cuadrados medios del análisis combinado para las variables Altura de Planta y Vigor.

FV	gl	Altura	Vigor
Ambiente	1	615.57**	3.52**
Ambiente>Bloque	4	436.18**	1.78**
Genotipo	20	80.54**	0.76**
Genotipo*Ambiente	20	15.81 ns	0.30 ns
Error	80	24.72	0.26
Total	125		
CV(%)		14.87	17.31

** indican diferencias altamente significativas con un valor de $p < 0.01$

Si bien es cierto que la variable Vigor es una variable muy subjetiva que dependerá de la experiencia del evaluador y de sus gustos particulares de acuerdo a la definición propia del ideotipo de planta, se ha indicado que el Vigor es la expresión de un amplio conjunto de variables vegetativas (Angola y Hernández, 2010) y se ha demostrado que tiene una correlación positiva y significativa con variables como emergencia de plantas a los 15 dds, altura de planta, peso de frutos, número de semillas por fruto, peso de 100 semillas, rendimiento e índice de preferencia por parte de los agricultores, lo cual muestra la importancia de esta variable como criterio integrador de selección.

Los resultados obtenidos para la variable Altura de Planta concuerdan con los obtenidos por distintos autores quienes reportan una disminución bajo condiciones de sequía (Moyeja, 1997 y Riveiro, 2012). Lo mismo fue observado en otras especies como papa, arroz, maíz, trigo y algodón en condiciones poca humedad disponible (Mamani-Rojas y François-Ledent, 2014; Perdomo, 2014; Farooq et al., 2009). Rahman et al., (2002) y Farooq et al (2009) señalan que esta reducción puede ser debido a la inhibición del alargamiento o división celular producto del déficit hídrico.

La variedad comercial ‘Tacarigua’ presentó el valor más alto con un promedio entre los ensayos de 42.67 cm, mientras que el genotipo I-2019 presentó el menor valor para esta variable con 27 cm. Aunque se ha demostrado que la sequía afecta de forma negativa la altura de la planta, no se ha demostrado relación alguna entre la altura y el rendimiento en condiciones de sequía (Moyeja, 1997). Lo observado en este trabajo muestra que como tendencia las plantas más bajas (<35 cm) suelen verse menos afectadas por la sequía con una reducción promedio del 8% de altura, mientras que las plantas más altas (≥ 35 cm) se ven más afectadas con una reducción promedio del 16%.

Cuadro 8. Prueba de Medias de Duncan para las variables Altura de Planta y Vigor.

Genotipo	Altura de Planta			Vigor				
	Riego	Sequía	Promedio	Riego	Sequía	Promedio		
‘Manuare’	40.33	33.33	36.83	abc	2.93	2.57	2.75	cdef
‘Tacarigua’	46.67	38.67	42.67	a	3.4	2.73	3.07	bcde
‘Tiziú’	31.67	29.67	30.67	cde	3.27	2.8	3.03	bcde
I-1997	31	28.33	29.67	de	2.87	2.6	2.73	cdef
I-2011	35.33	32	33.67	cde	3.33	3.13	3.23	abcd
I-2019	30.33	23.67	27	e	2.47	2.27	2.37	ef
I-2041	37	32.67	34.83	bcd	2.73	2.8	2.77	cdef
I-2155	41.67	40	40.83	ab	3.2	3	3.1	abcd
I-2216	39.33	29	34.17	cd	3.53	2.67	3.1	bcd
I-2218	34.33	37.33	35.83	bcd	2.13	2.93	2.53	def
I-2363	38	29	33.5	cde	3	2.33	2.67	cdef
I-2368	36.67	30.67	33.67	cde	3.2	2.8	3	bcdef
I-2494	36.67	29.67	33.17	cde	2.47	2.2	2.33	f
I-2581	32.67	28.67	30.67	cde	3.53	2.6	3.07	bcde
I-2583	33.17	26.33	29.75	de	2.85	2.47	2.66	cdef
I-2592	33.67	32.67	33.17	cde	2.6	2.8	2.7	cdef
Línea 13 (Gen 19)	36	32.67	34.33	cd	3.67	3.07	3.37	abc
UCV- Línea 16	30.33	27.67	29	de	3.07	3.2	3.13	abcd
UCV-100	33.33	30.67	32	cde	3	2.8	2.9	bcdef
UCV-56	37.67	30.67	34.17	cd	4.13	2.8	3.47	ab
UCV-88	32.67	32.33	32.5	cde	3.87	3.67	3.77	a
Promedio	35.64 a	31.22 b	33.43		3.11 a	2.77 b	2.94	

Medias con una letra común no son estadísticamente diferentes ($p=0.05$)

Plantas Erectas (%)

El Cuadro 9 muestra la clasificación correspondiente al hábito de crecimiento en caraota descrito por Voysest (2000). A este respecto, Angola y Hernández (2010) indicaron que los productores Venezolanos usan variedades con hábito de crecimiento tipo II y IV. El hábito de crecimiento tipo II, Hace referencia a las plantas de crecimiento arbustivo erecto. En dichas plantas, luego de ocurrir la floración, continúa creciendo el tallo principal, desarrollando una guía con escaso crecimiento. Las ramificaciones se originan del tallo principal y dichas ramas serán de porte erecto también.

Por otro lado, el hábito de crecimiento tipo IV, se refiere las plantas de crecimiento indeterminado con tallo débil de característica trepadora llegando a alcanzar los dos metros de altura si se ofrecen las condiciones necesarias de tutorado.

Cuadro 9. Criterios de clasificación del hábito de crecimiento en Caraota (*Phaseolus vulgaris* L.).

Genética	CIAT		Popular	
	Simplificada	Refinada	Refinada	Simplificada
Determinado	I	I – a	Arbustivo erecto	Arbustivo
		I – b		
Indetermanado	II	II – a	Semi trepador	Trepador
		II – b		
	III	III – a	Trepador	
		III – b		
	IV	IV – a		
		IV – b		

Fuente: Voysest, O., 2000

Todos los genotipos evaluados presentaron un hábito de crecimiento tipo II-a y II-b. Sin embargo, en este trabajo, los resultados para esta variable son presentados en términos de Plantas Erectas (%) correspondientes al hábito de crecimiento tipo II-a.

Esta descripción obedece al hecho de que el porte ‘arbustivo erecto’ es el hábito de crecimiento deseado por la mayoría de productores de zonas bajas del país.

León (2014) al realizar un ensayo bajo un esquema de mejoramiento participativo, reportó que los criterios considerados por los agricultores a fin de calificar como bueno, regular o malo un cultivar destaca el hábito de crecimiento, teniendo una alta preferencia por aquellas plantas tipo ‘Arbolito o Matica’ (descripción del agricultor) correspondientes al porte ‘arbustivo erecto’, II-a. Siendo este carácter de alta preferencia por los productores del país, León (2014) recomienda que en los programas de mejoramiento genético de caraota debe considerarse los cultivares de dicho hábito de crecimiento.

La figura 3 muestra el % de Plantas erectas por genotipo para cada ensayo. En el mismo se observa que aquellos cultivares con 100% de plantas erectas para ambos ensayos corresponden a líneas avanzadas y cultivares comerciales (UCV-56, UCV-88, UCV-100, Línea 13 y ‘Tiziú’) los cuales se caracterizan por tener una alta uniformidad para caracteres cualitativos y cuantitativos. Lo mismo ocurre con algunas variedades locales como I-2592, I-2581, I-2216, I-2041 e I-1997.

Para las variedades comerciales ‘Manuare’, ‘Tacarigua’ y el resto de las variedades locales se observó la presencia de los hábitos de crecimiento tipo II-a y II-b. La presencia de ambos tipos de porte puede deberse a la genética propia de cada cultivar. León (2014) señala que en Venezuela, los cultivares de caraota son líneas puras o mezclas de líneas que provienen de una base genética bastante estrecha. Por esta razón, una constitución genética homocigota pero heterogénea, producto de mezcla de iso-líneas, explican la variabilidad para este y otros caracteres los cuales le dan cierta adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales.

Por otro lado, Angola y Hernández (2010) al evaluar el hábito de crecimiento de 20 poblaciones segregantes en generaciones avanzadas en dos localidades observaron que 6 presentaron un porte tipo II-a con segregantes tipo II-b en la localidad con mayor humedad, indicando que esta condición favorece el desarrollo vegetativo de la

planta estimulando un mayor crecimiento de la guía y ramas laterales. Lo mismo fue descrito por otros autores donde señalan que la longitud de la guía (diferenciación entre porte tipo II-a y II-b) se debe tanto a la genética de la variedad como a las condiciones ambientales donde se desarrolle (Miranda, 1966; Restrepo, 2007).

De los 21 genotipos evaluados, seis de ellos presentaron valores inferiores al 100% de plantas erectas, siendo los valores más bajos los observados en condiciones de riego durante todo el ciclo del cultivo ('Manuare', 'Tacarigua', I-2041, I-2155, I-2218 e I-2494) y otros cuatro presentaron valores de 100% de plantas erectas en condiciones de sequía pero valores inferiores para las condiciones de riego (I-2019, I-2363, I-2368 e I-2583). Este comportamiento puede deberse tanto a factores genéticos como a factores ambientales de humedad en cada ensayo.

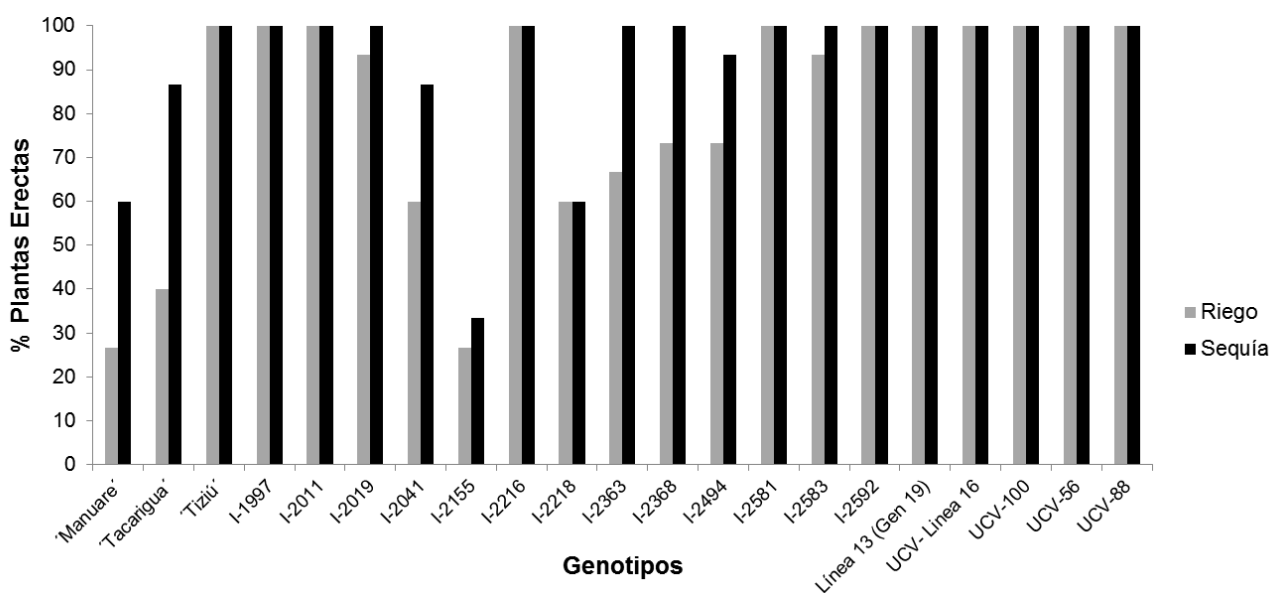


Figura 3. Valores promedios de % de plantas Erectas por cada genotipo en cada ensayo evaluado.

IV. Variables Fenológicas

Las variables Fenológicas Días a mitad de llenado de vainas, Días a madurez fisiológica y Días de llenado de grano presentaron valores promedios superiores en el ensayo de Sequía que en el ensayo de Riego mientras que la variable Grado de

desarrollo presento un promedio superior en el ensayo de Riego en contraste con el ensayo de Sequía con valores de 5.53 y 4.69 respectivamente. En cuanto a los Días a floración se observaron valores promedios similares para ambos ensayos (Cuadro 10).

Cuadro 10. Estadísticos descriptivos de variables fenológicas evaluadas.

Variables	Ensayo	Media	Mín	Máx	Asimetría	Kurtosis	Normalidad
Grado de Desarrollo	Riego	5.53 ± 1.9	2.31	9.43	0.25	-0.66	0.94
	Sequía	4.69 ± 1.97	1.11	9.17	0.48	0.76	0.93
Días a Floración	Riego	40.14 ± 3.04	35	46	0.01	-0.77	0.93
	Sequía	40.03 ± 2.53	35	45	0.11	-0.45	0.92
Días a Mitad de Llenado de vainas	Riego	63.25 ± 5.08	50	66	-1.76	1.71	0.57
	Sequía	72.13 ± 5.9	49	83	-2.44	8.06	0.62
Días a Madurez Fisiológica	Riego	76.92 ± 1.99	74	81	-0.23	-0.94	0.93
	Sequía	86.11 ± 4.08	71	91	2.2	4.76	0.87
Días llenado de grano	Riego	36.78 ± 2.54	31	42	-0.11	-0.62	0.95
	Sequía	46.08 ± 3.54	36	52	-0.82	0.57	0.93

La variable Grado de Desarrollo fue calculada como el promedio ponderado de distintas etapas fenológicas con la finalidad de conocer el Grado de desarrollo para cada genotipo en condiciones de Riego y Sequía. Las etapas fenológicas utilizadas y los valores asignados fueron: Estado vegetativo (1), Botón floral (3), Flores (5), Frutos incipientes (7), Frutos en desarrollo (9) y Frutos grandes (11). El promedio ponderado es interpretado como un índice de desarrollo del cultivar.

Para cada ensayo se observaron diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0.01$) entre los genotipos evaluados (Cuadro 11). Así mismo, la prueba de homogeneidad de varianzas de Hartley permitió realizar un análisis combinado para esta variable (Cuadro 12).

Cuadro 11. Análisis de varianza por ambiente para todas las variables fenológicas evaluadas

FV	gl	Grado de Desarrollo		Días a Floración		Días a Madurez Fisiológica		Días llenado de grano	
		Riego	Sequía	Riego	Sequía	Riego	Sequía	Riego	Sequía
Bloque	2	5.24**	16.44**	2.05*	3.87**	12.25**	0.44	18.78**	3.30 ns
Genotipo	20	9.09**	8.20**	27.19**	18**	6.96**	50.18**	13.21**	34.96**
Error	40	0.8	1.11	0.6	0.71	2.07	0.64	2.43	1.77
Total	62								
CV (%)		16.15	22.48	1.93	2.1	1.87	0.93	4.24	2.89

* y ** indican diferencias significativas con un valor de $p < 0.05$ y $p < 0.01$ respectivamente; ns: diferencias estadísticas no significativas.

Cuadro 12. Cuadrados medios del error y Prueba de Hartley para las variables fenológicas evaluadas.

Cuadrado Medio del Error		Grado de Desarrollo	Días a Floración	Días a Madurez Fisiológica	Días llenado de grano
		Riego	0.8	0.6	2.07
	Sequía	1.11	0.71	0.64	1.77
Prueba de Hartley		1.39	1.18	3.23	1.37

El análisis combinado mostro diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) para las fuentes de variación Ambiente y Genotipo, mas no para la interacción Genotipo x Ambiente. Estos resultados indican que el Grado de desarrollo del cultivo es muy afectado por la condición de sequía, causando una disminución en el mismo.

Los genotipos que presentaron un mayor grado de desarrollo al momento de la evaluación fueron I-2592, 'Manuare', UCV-100, UCV-56 e I-2155 con valores de 8.5, 7.5, 7.9, 7.1 y 7.1 respectivamente. Estos genotipos se encontraban entre las etapas Frutos en desarrollo (7) y Frutos grandes (9) mientras que el promedio de todo el ensayo fue 5.11 correspondiente a la etapa Frutos incipientes (5).

Un mayor desarrollo antes de que la intensidad de la sequía sea mayor es considerado un mecanismo de tolerancia, pues permite a la planta aprovechar el agua disponible antes de que las necesidades hídricas sean mayores (Mayor, 2010 y Acosta-Díaz 2014).

En cuanto a los Días a floración en el ensayo de Riego se observaron valores en un rango de 35 a 46 días con un promedio de 40.14, siendo el genotipo más precoz I-2592 y el más tardío I-2011, mientras que en el ensayo de sequía se obtuvieron promedios similares con un rango de 35 a 45 días, siendo el genotipo más precoz I-2592 y el más tardío I-2019.

Los Días a mitad de llenado de vainas presentaron valores promedios de 63.25 y 72.13 con rangos de 50 a 66 y de 49 a 83 en los ensayos de Riego y Sequía, respectivamente. Para esta variable no fue posible realizar el análisis de varianza por ambiente debido al no cumplimiento del supuesto de normalidad de los datos.

En la figura 4 se muestra un polígono de frecuencia para esta variable en cada ensayo. La distribución de los datos indica que para el ensayo de sequía casi todos los genotipos tardaron más días en alcanzar la etapa de mitad de llenado de vainas en comparación con el ensayo de riego.

Aunque en promedio ambos ensayos alcanzaron la floración a los 40 dds aproximadamente, las diferencias en los días a mitad de llenado de vainas puede deberse a la alta aborción floral observada en el ensayo de sequía, atrasando el llenado de vainas hasta después de la incorporación del riego. Muchos trabajos han reportado el efecto negativo de la sequía y del estrés térmico sobre la aborción floral, la fertilización, la polinización y el llenado de granos en caraota (Chantiro *et al.*, 2016; Madriz, 2009).

Para la variable Días a madurez fisiológica se obtuvieron valores promedios de 76.92 y 86.11 para los ensayos de Riego y Sequía respectivamente, siendo el cultivar I-2592 el más precoz en ambos ensayos y el más tardío fue UCV-Línea 16 para el ensayo de Riego y 'Tiziú' para el ensayo de Sequía. Finalmente, los Días de llenado de grano, que son calculados como la diferencia entre los días a floración y días a madurez fisiológica presentaron valores promedios para el ensayo de Riego de 36.78 y 46.08 para el ensayo de Sequía.

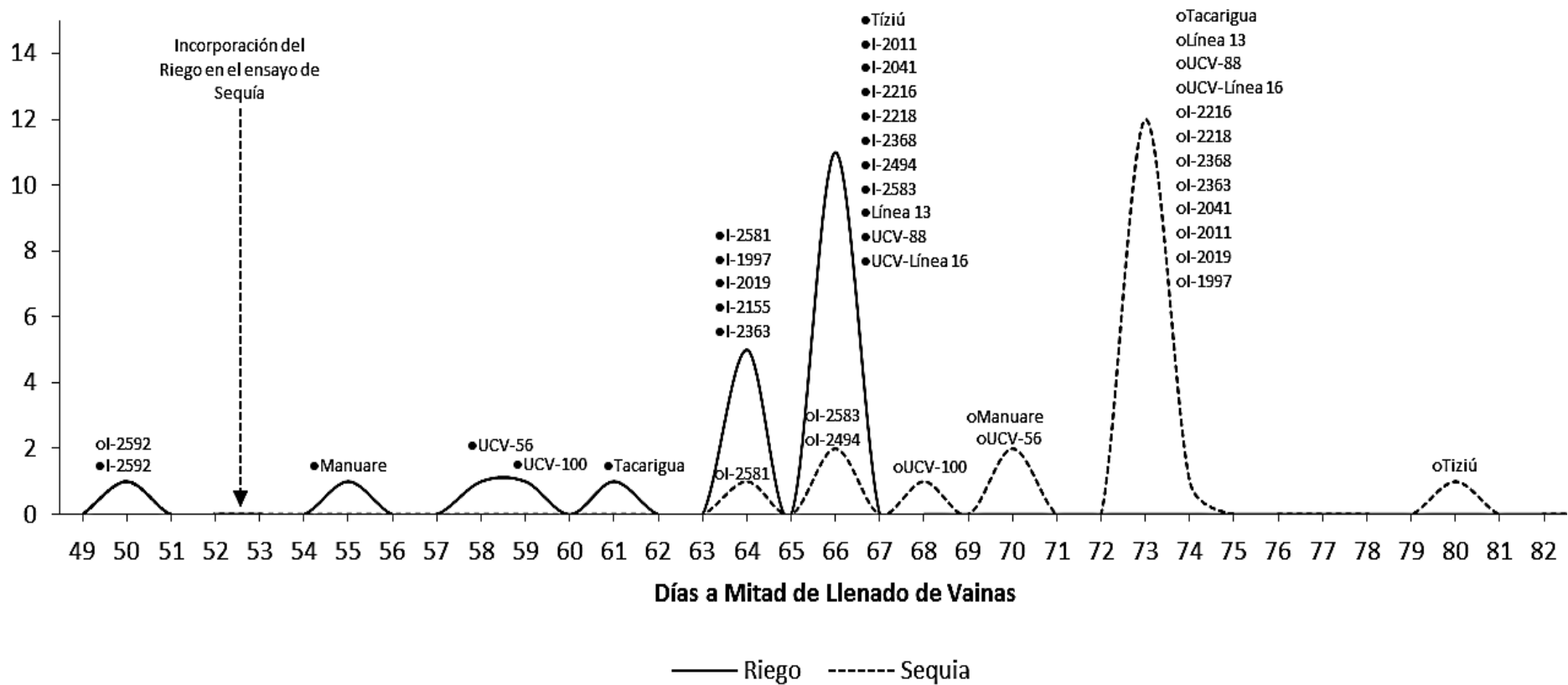


Figura 4. Polígono de frecuencia para la variable Días a Mitad de Llenado de Vainas en los ensayos de Riego y Sequía.

Para todas las variables que cumplieron con los supuestos del análisis de varianza existieron diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0.01$) entre los genotipos para cada ensayo (Cuadro 11). Partiendo de los cuadrados medios del error se realizó la prueba de homogeneidad de varianzas de Hartley cuyos resultados permitieron realizar el análisis combinado (Cuadro 12).

Aunque no existieron diferencias entre las condiciones de Riego para la variable Días a floración, si existieron diferencias significativas para la interacción Genotipo x Ambiente (Cuadro 13), indicando una respuesta diferencial de algunos genotipos ante la condición de estrés. Por ejemplo, los genotipos que adelantaron los días a floración en condición de sequía fueron: 'Tiziú', I-2011, I-2041, I-2216, I-2368, I-2581, I-2583 y UCV-Línea 16 con una reducción entre 1 a 5 días.

Por otro lado, a excepción de las variedades I-2494, I-2592 y UCV-88 quienes mantuvieron los mismos días a floración en ambos ensayos, el resto de los genotipos atrasaron los días a floración hasta un máximo de 5 días como se observó para la variedad local I-1997 (Cuadro 14).

Cuadro 13. Análisis de la varianza combinado para las variables Fenológicas evaluadas.

FV	gl	Grado de Desarrollo	Días a Floración	Días a Madurez Fisiológica	Días llenado de grano
Ambiente	1	22.20**	0.39 ns	2660.64**	2725.37**
Ambiente>Bloque	4	10.84**	2.96**	6.35**	11.04**
Genotipo	20	16.61**	37.98**	35.17**	21.68**
Genotipo*Ambiente	20	0.68 ns	7.21**	21.98**	26.50**
Error	80	0.95	0.65	1.36	2.1
Total	125				
CV(%)		19.12	2.01	1.43	3.5

* y ** indican diferencias significativas con un valor de $p < 0.05$ y $p < 0.01$ respectivamente; ns: diferencias estadísticas no significativas.

Resultados similares fueron reportados por Rodríguez *et al.* (2009) quienes observaron una reducción de hasta 2 días en la fecha de floración cuando los

genotipos eran sometidos a sequía. Así mismo, Moyeja (1997) reportó que los genotipos Criolla San Juan, Dor-227 y EXP-145 adelantaron la fecha de floración unos 5, 7 y 3 días respectivamente, mientras que los genotipos EMP-192 e ICA-PIJAO retrasaron la fecha de floración en unos 4 y 3 días respectivamente al ser evaluados en condiciones de déficit hídrico.

El adelanto en los días a floración bajo condiciones de sequía está relacionado con la capacidad de algunos genotipos para modificar el inicio de la floración en respuesta a la disponibilidad de humedad, permitiéndoles reducir el efecto negativo de la sequía en el momento de la floración (Rosales *et al.*, 2000 y Riveiro 2012). En este sentido los genotipos que más adelantaron la floración bajo condiciones de estrés por déficit hídrico fueron las variedades I-2583 con 4 días y UCV-Línea 16 con 5 días.

Cuadro 14. Prueba de medias de Duncan para variables Grado de desarrollo y Días a floración.

Genotipo	Grado de Desarrollo			Días a Floración					
	Riego	Sequía	Promedio	Riego	Sequía	Promedio			
‘Manuare’	8.8	6.3	7.5	ab	35	rs	37	qr	36
‘Tacarigua’	6.2	5.0	5.6	c	39	klmn	40	ijkl	40
‘Tiziú’	4.6	3.7	4.2	def	42	efgh	41	hijk	41
I-1997	4.7	3.8	4.2	def	39	lmno	44	bc	42
I-2011	2.7	2.5	2.6	g	46	a	44	bcd	45
I-2019	3.9	3.0	3.5	efg	41	ghij	44	abc	43
I-2041	3.8	2.4	3.1	fg	45	ab	44	bcd	44
I-2155	7.5	6.8	7.1	b	37	pq	38	nop	38
I-2216	5.7	4.3	5.0	cd	40	jklm	39	mno	39
I-2218	4.7	3.6	4.1	def	42	fghi	42	defg	42
I-2363	5.4	4.0	4.7	cde	39	mno	39	klmn	39
I-2368	3.9	3.8	3.9	defg	43	bcde	41	hijk	42
I-2494	5.0	4.4	4.7	cde	39	lmno	39	lmno	39
I-2581	5.8	5.5	5.7	c	40	ijkl	39	klmn	40
I-2583	4.7	3.7	4.2	def	43	cdef	39	klmn	41
I-2592	8.4	8.6	8.5	a	35	s	35	s	35
Línea 13	4.2	3.5	3.8	defg	41	hijk	40	ijkl	41
UCV-100	8.4	7.5	7.9	ab	37	pq	38	nop	38
UCV-56	8.0	6.2	7.1	b	37	qr	38	opq	37
UCV-88	5.8	5.8	5.8	c	39	klmn	39	klmn	39
UCV-Línea 16	4.1	4.2	4.1	def	44	abc	40	jklmn	42
Promedio	5.53 a	4.69 b	5.11		40.14		40.03		40.09

Medias con una letra común no son estadísticamente diferentes (p=0.05)

Las variables Días a madurez fisiológica y Días de llenado de grano fueron muy afectadas por la condición de sequía (Cuadro 13). Para todos los genotipos, a excepción de I-2592 y UCV-100, se observó un atraso en los días a madurez fisiológica y por ende un aumento en los días de llenado de grano. Para la variedad local I-2592 se observó un adelanto de la madurez fisiológica de 3 días y para la línea avanzada UCV-100 no se observaron diferencias entre los valores obtenidos en los ensayos de Riego y Sequía con un valor promedio entre ambos ensayos de 78 días (Cuadro 15).

A diferencia de los resultados de este trabajo, distintos autores señalan que el comportamiento general observado en estos tipos de ensayos es un aumento en la precocidad de los genotipos, es decir, valores de días a madurez fisiológica menores bajo condiciones de sequía que bajo condiciones de riego (Beebe *et al.*, 2008; Rodríguez *et al.*, 2009; Polania *et al.*, 2012 y Acosta-Díaz *et al.*, 2014).

Esos resultados pueden deberse a que los ensayos llevados por dichos autores no incluyen la aplicación del riego una vez inducida la sequía por cierto tiempo. A este respecto, Acosta-Díaz *et al.* (2014) señalan que el aceleramiento de la madurez por lo general se observa cuando el tratamiento de sequía es de duración prolongada durante la fase reproductiva y no existen condiciones favorables para la recuperación de los genotipos.

Adicionalmente, Riveiro (2014) reportó un grupo de genotipos, los cuales ante un estrés hídrico aumentaron sus parámetros fenológicos, incrementando los días para madurez de vaina y primera vaina seca, así como los días de floración. Este mismo autor indica que una estrategia de floración tardía puede dar buen resultado en caso de que el estrés sea puntual y la planta sea capaz de generar nuevas hojas y flores.

Este comportamiento es definido como la capacidad de recuperación de un genotipo ante una condición de estrés y pertenece a uno de los mecanismos de tolerancia a la sequía denominado *escape*, el cual consiste principalmente en acoplar el ciclo biológico a los meses con mayor disponibilidad de agua. De esta manera, un genotipo

puede acortar o alargar su ciclo fenológico, a través de una madurez temprana o tardía para conseguir el mismo objetivo, *escapar* al periodo de sequía, disminuyendo su efecto sobre el rendimiento (Medrano *et al.*, 2007 y Mayor, 2010).

Esta respuesta diferencial puede observarse al comparar los genotipos I-2592 y UCV-56. Ambos genotipos tienen la misma fecha de madurez fisiológica en condiciones de riego óptimo (75 días). Sin embargo, en condiciones de sequía, la variedad I-2592 reduce su ciclo a 72 días mientras que UCV-56 alarga su ciclo hasta 87 días (Cuadro 15). Si esta respuesta permite mantener o incluso aumentar los rendimientos, la estrategia de dichos genotipos sería efectiva ante la condición de estrés.

Cuadro 15. Prueba de medias de Duncan para las variables Días a madurez fisiológica y Días de llenado de grano.

Genotipo	Días a Madurez Fisiológica			Días llenado de grano		
	Riego	Sequía	Promedio	Riego	Sequía	Promedio
‘Manuare’	74 kl	86 d	80	39 hij	49 bc	44
‘Tacarigua’	76 ijk	87 cd	82	37 jklmn	47 cdef	42
‘Tiziú’	78 fghi	90 a	84	36 klmn	50 ab	43
I-1997	76 ijk	89 ab	83	37 ijklmn	45 efg	41
I-2011	78 fghi	87 cd	82	32 o	43 g	38
I-2019	77 ghi	87 cd	82	36 jklmn	43 g	40
I-2041	79 fg	87 cd	83	35 mn	43 g	39
I-2155	75 jk	87 cd	81	38 hijkl	49 bcd	43
I-2216	78 fghi	87 cd	83	38 hijkl	48 bcd	43
I-2218	76 ijk	87 cd	82	34 no	45 fg	40
I-2363	77 hij	86 cd	82	38 hijk	47 bcdef	43
I-2368	78 fghi	87 cd	82	34 no	46 def	40
I-2494	76 ijk	91 a	84	37 ijklmn	52 a	45
I-2581	77 hij	87 cd	82	36 jklmn	48 bcde	42
I-2583	78 fghi	87 cd	82	35 mn	48 bcde	41
I-2592	75 jk	72 l	74	40 h	37 hijklm	39
Línea 13	78 fghi	87 cd	82	37 ijklmn	47 cdef	42
UCV-100	77 hij	78 fgh	78	40 hi	40 h	40
UCV-56	75 jk	82 e	79	38 hijk	44 fg	41
UCV-88	79 fg	87 cd	83	40 h	48 bcde	44
UCV-Línea 16	80 f	88 bc	84	35 lmn	49 bcd	42
Promedio	76.92	86.11	81.52	36.78	46.08	41.43

Medias con una letra común no son estadísticamente diferentes ($p=0.05$)

Finalmente, los genotipos que más alargaron su ciclo fenológico aumentando los días a madurez fisiológica en condiciones de sequía fueron I-2494, 'Tiziú' e I-1997 con valores de 91, 90 y 89 días, respectivamente.

En cuanto a la variable Días de llenado de grano, su comportamiento es similar al de Días a madurez fisiológica, siendo la variedad I-2592 la que presenta menor periodo de llenado de grano con 37 días e I-2494 el de mayor con 52 días. De todos los genotipos evaluados, sólo I-2592 tuvo una reducción en los días de llenado de grano, debido al acortamiento del ciclo fenológico. Así mismo, la línea avanzada UCV-100 presento el mismo periodo de llenado de grano en ambos ensayos, a saber, 40 días (Cuadro 15).

La variable Días de llenado de grano es una variable calculada en base a la diferencia entre los Días a floración y los Días a madurez fisiológica. La interpretación de este valor bajo condiciones de riego óptimo representa un estimado bastante confiable del tiempo requerido por una planta para alcanzar el máximo llenado de grano a partir del momento de floración debido a la alta uniformidad en el desarrollo fenológico. Sin embargo, bajo condiciones de sequía, especialmente la inducida en este ensayo con reintegro del riego a los 53 dds, esta variable no representa necesariamente lo mismo y por ende, su interpretación no puede ser la misma.

A pesar de que en promedio los días a floración fueron similares en los ambientes de riego y sequía, fue en este último donde se observó una alta aborción de flores, como se comentó anteriormente. El polígono de frecuencia presentado en la figura 4 indica que el día a mitad de llenado de vaina en sequía presentó un atraso considerable en comparación con el ensayo de riego, a excepción del genotipo I-2592 quien por ser muy precoz logró escapar del efecto de la sequía.

Dicho atraso parece ser una respuesta a la reincorporación del riego, induciendo un segundo desarrollo tanto vegetativo como reproductivo en el cultivo, aspectos que aunque no fueron evaluados en este trabajo, si fueron observados. Por esta razón, podemos pensar que el hecho de que un genotipo alcance la floración en condiciones

de estrés, no significa que a partir de ese momento comience el llenado de grano, debido a la alta aborción de flores. Dicho comportamiento puede deberse a la metodología llevada a cabo en este trabajo con relación a la inducción de la sequía y a la reincorporación del riego.

V. Variables Fisiológicas

Movilización de foto-asimilados

El rendimiento de un cultivo depende de cómo su biomasa es particionada. Para incrementar el rendimiento, el mejorador puede aumentar tanto la biomasa como la eficiencia en el particionamiento de asimilados. A su vez, el particionamiento dependerá de la especie y del producto de interés comercial. Las estrategias de compensación entre las partes de la planta puede llegar a ser entonces de tres tipos: Aumentar el desarrollo vegetativo sacrificando el desarrollo reproductivo, aumentar el desarrollo vegetativo sacrificando otro desarrollo vegetativo y finalmente, aumentar el desarrollo reproductivo sacrificando el desarrollo vegetativo (Acquah, 2007). Es esta última estrategia la que se aplica al cultivo de caraota, donde el producto de interés económico es la semilla.

Distintos autores han reportado que líneas de caraota tolerantes a la sequía tienden a producir una menor biomasa pero con un alto rendimiento en grano (Rao, 2001; Beebe *et al.*, 2008 y Polania *et al.*, 2010). Beebe *et al.* (2008) y Klaedtke *et al.* (2012) atribuyen este comportamiento a una gran movilización de foto-asimilados hacia el desarrollo de granos, llegando a la conclusión de que las diferencias en el particionamiento de la biomasa encontradas en caraota juegan un papel clave en el mejoramiento para la tolerancia a la sequía en este cultivo.

Para medir esta cualidad de la planta se han utilizado índices basados en su biomasa de la planta. Entre los índices más usados se encuentra el índice de cosecha, el cual es comúnmente calculado como el % de producto comercial obtenido en términos de biomasa en base a la biomasa total producida por la planta, y es interpretado como % de movilización de biomasa hacia el producto comercial, como por ejemplo,

rendimiento en granos (Moyeja, 1997; Acosta-Díaz *et al.*, 2014; White *et al.*, 2006 y Blum, 2009). Otro índice propuesto en este cultivo es el Índice de cosecha a vaina (ICV), el cual indica la movilización de asimilados desde la cáscara hacia la formación del grano (Polania *et al.*, 2010), este índice se basa en el hecho de que la cascara de la vaina es la fuente de carbono para el desarrollo de la semilla (Turner *et al.*, 2005).

En términos generales, se observaron % de movilización de foto-asimilados superiores en condiciones de riego que en condiciones de estrés por sequía tanto para el índice de cosecha (IC) como para el Índice de cosecha a vaina (ICV) con valores de 61.44% en riego y 49.25% en estrés para IC y 67.10% en riego y 59.32% en estrés para ICV (Cuadro 16). Resultados similares fueron obtenidos por Acosta-Díaz *et al.* (2004), reportando valores de IC de 47.7% en riego y 43% en sequía. Igualmente, Moyeja (1997) reportó valores de IC de 51% en condiciones de riego y 44% en condiciones de sequía indicando el efecto negativo de la sequía sobre la capacidad de movilización de asimilados desde las hojas y tallos hacia la producción de granos, especialmente cuando el estrés coincide con la etapa reproductiva del cultivo (Moyeja, 1997; Acosta *et al.*, 1999; Acosta-Díaz *et al.*, 2013 y Rao, 2013).

En cuanto al Índice de cosecha a vaina, Rao (2013) también observó una disminución promedio ante las condiciones de sequía. Polania (2011) reportó valores de 80.53% en condiciones de riego y 74.16% en condiciones de estrés. Con relación a este índice, pocos han sido los trabajos encontrados que lo utilizan como criterio de selección para la tolerancia a la sequía (Rao, 2013; Polania, 2011; Beebe *et al.*, 2013). Dichos trabajos han sido desarrollados en Colombia, especialmente en el CIAT.

Los valores superiores reportados en estos trabajos, con relación a los obtenidos en este estudio, pueden ser un reflejo de la selección hacia esta variable en los programas de mejoramiento. A este respecto Beebe *et al.* (2013) identificaron la línea MR81 producto del cruce entre las líneas MD 23-24 y SEA5 el cual presentó un

comportamiento superior para todos los índices de particionamiento de la biomasa, entre ellos el índice de cosecha de vaina.

Por otro lado, los genotipos evaluados en este ensayo son principalmente variedades locales, las cuales han sido producto de la selección empírica por parte de los agricultores. Adicionalmente, las variedades comerciales y líneas avanzadas de programas de mejoramiento fueron desarrolladas sin tomar en cuenta esta variable. Aunque tienen un alto potencial de rendimiento y resistencia a algunas enfermedades, la eficiencia en el particionamiento de la biomasa no fue incluida como criterio de selección, al menos por la medición directa de esta variable (Ramis, 2016. Comunicación personal).

Sin embargo, la línea avanzada UCV-56 fue seleccionada por su porte erecto y compacto. A pesar de ser una planta pequeña y con poco desarrollo de follaje presenta altos rendimientos y una muy buena calidad de grano. De hecho, esta línea presentó el mayor valor para la variable IC con 68.8% en condiciones de riego, indicando su alta eficiencia en el particionamiento de la biomasa. Esta selección indirecta hacia un alto índice de cosecha está relacionada con lo que se conoce como el ideo-tipo de planta que posee cada mejorador. Aunque tener en mente el fenotipo ideal de acuerdo a un objetivo en particular requiere conocer tanto el cultivo como las bases fisiológicas que modelan dicho fenotipo, todos los mejoradores de manera consciente o inconsciente tienen un ideo-tipo en mente el cual conduce su selección en poblaciones segregantes y generaciones tempranas de los programas de mejoramiento genético (Acquah, 2007).

Volviendo al uso de los índices de partición de biomasa, los mismos tienen como ventaja ser estables en la expresión de los genotipos, pero no siempre están relacionados con altos rendimientos. Por ello, es recomendable su uso como criterio de selección secundario para mejorar el rendimiento *per se* de un genotipo (Riveiro, 2012).

De los índices de partición de biomasa calculados solo el Índice de cosecha de vaina en el ensayo de sequía mostró diferencias estadísticas entre los genotipos (Cuadro 17). Aun así, los resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas de Hartley permitieron realizar el análisis combinado para IC e ICV (Cuadro 18).

Cuadro 16. Estadísticos descriptivos obtenidos para las variables fisiológicas evaluadas.

Variables	Ensayo	Media	Mín	Máx	Asimetría	Kurtosis	Normalidad
Índice de cosecha (IC)	Riego	61.44 ± 5.12	42.46	74.79	-0.57	0.92	0.95
	Sequía	49.25 ± 7.51	26.91	60.75	-0.76	0.28	0.94
Índice de cosecha a vaina (ICV)	Riego	67.10 ± 14.18	50.9	78.3	-0.82	1.52	0.95
	Sequía	59.32 ± 5.23	44.38	69.85	-0.39	-0.16	0.97
Lectura SPAD	Riego	39.36 ± 2.70	32.2	43.13	-0.67	0.47	0.95
	Sequía	44.17 ± 3.64	35.32	51.37	-0.46	-0.18	0.96

Cuadro 17. Análisis de varianza para variables fisiológicas evaluadas.

FV	gl	Índice de Cosecha		Índice de Cosecha a vaina		Lectura SPAD	
		Riego	Sequía	Riego	Sequía	Riego	Sequía
Bloque	2	34.42 ns	224.50**	53.75 ns	106.77**	8.55 ns	21.20 ns
Genotipo	20	21.15 ns	71.61 ns	14.4 ns	40.55**	6.6 ns	24.16**
Error	40	28.33	40.44	17.02	16.81	7.57	7.39
Total	62						
CV (%)		8.66	12.91	6.19	6.91	6.99	6.16

* y ** indican diferencias significativas con un valor de $p < 0.05$ y $p < 0.01$ respectivamente; ns: diferencias estadísticas no significativas

El análisis combinado mostró que ambos índices de partición de la biomasa fueron afectados por la condición de sequía ($p < 0.01$), aspecto que ha sido señalado por otros autores, como se comentó anteriormente. Solamente el Índice de cosecha de vaina mostro diferencias significativas para la interacción Genotipo x Ambiente con una $p < 0.05$ (Cuadro 19). Esto indica una respuesta diferencial de los genotipos ante la condición de sequía para esta variable.

De los 21 genotipos evaluados, 11 presentaron diferencias estadísticas bajo la condición de riego y de sequía, lo que significa que estos genotipos disminuyen la capacidad de movilización de asimilados desde la vaina a la semilla bajo condiciones de estrés. Estos genotipos fueron ‘Manuare’, I-1997, I-2011, I-2019, I-2216, I-2218, I-2368, I-2494, UCV-56, UCV-88 y UCV-Línea 16.

De estos, los genotipos I-2218, I-2216 y UCV-56 presentaron los mayores valores bajo condición de riego (71.45%, 70.21% y 70.06%, respectivamente) y solo I-2216 presentó el mayor % de movilización de foto-asimilados de vaina a semilla en condición de sequía (60.57%) mostrando el mayor valor promedio entre ambos ensayos para este grupo de genotipos con un valor de 65.39% (Cuadro 20).

Por otro lado, los genotipos ‘Tacarigua’, ‘Tiziú’, I-2041, I-2155, I-2363, I-2581, I-2583, I-2592, Línea 13 y UCV-100 no mostraron diferencias estadísticas bajo condiciones de riego y sequía (Cuadro 20). Estos genotipos logran mantener el % de movilización de asimilados a pesar de la condición de estrés por déficit hídrico. De este grupo de genotipos, las variedades locales I-2581 e I-2363 presentaron los mayores valores en condición de sequía (65.71% y 64.89% respectivamente).

Adicionalmente, estos dos genotipos presentaron los mayores valores promedios para el índice de cosecha con valores de 58.29% y 60.61%, respectivamente. La combinación de altos valores de Índice de cosecha de vaina e índice de cosecha en condiciones de estrés es considerado un mecanismo de tolerancia a la sequía (Beebe *et al.*, 2008; Beebe *et al.*, 2013 y Rao, 2013).

Cuadro 18. Prueba de homogeneidad de varianzas de Hartley para variables fisiológicas evaluadas.

Cuadrado Medio del Error	Índice de Cosecha	Índice de Cosecha a vaina	Lectura SPAD
	Riego	28.33	17.02
Sequía	40.44	16.81	7.39
Prueba de Hartley	1.43	1.01	1.02

Cuadro 19. Análisis de la varianza combinado para variables fisiológicas evaluadas.

FV	gl	Índice de Cosecha	Índice de Cosecha a Vaina	Lectura SPAD
Ambiente	1	4685.65**	1907.89**	728.16**
Ambiente>Bloque	4	129.46**	80.35**	14.88 ns
Genotipo	20	40.75 ns	23.09 ns	12.68 ns
Genotipo*Ambiente	20	52.01 ns	31.88*	18.08**
Error	80	34.39	17	7.48
Total	125			
CV(%)		10.6	6.52	6.55

* y ** indican diferencias significativas con un valor de $p < 0.05$ y $p < 0.01$ respectivamente; ns : diferencias estadísticas no significativas

Cuadro 20. Prueba de medias de Duncan para los índices de particionamiento de la biomasa evaluados.

Genotipo	Índice de Cosecha			Índice de Cosecha a Vaina		
	Riego	Sequía	Promedio	Riego	Sequía	Promedio
‘Manuare’	60.80	50.59	55.70	67.49 abcde	57.52 hijk	62.51
‘Tacarigua’	59.86	50.61	55.24	67.38 abcde	60.72 defghij	64.05
‘Tiziú’	59.09	50.57	54.83	66.61 abcdef	61.92 bcdefghij	64.27
I-1997	62.18	45.59	53.89	67.35 abcde	54.14 jk	60.75
I-2011	61.51	46.95	54.23	69.5 abc	61.21 cdefghij	65.36
I-2019	56.35	47.02	51.69	63.49 abcdefgh	54.19 jk	58.84
I-2041	60.41	51.74	56.08	64.69 abcdefgh	58.78 fghijk	61.74
I-2155	61.48	51.09	56.29	66.9 abcdef	59.95 efghij	63.43
I-2216	65.36	47.38	56.37	70.21 ab	60.57 defghij	65.39
I-2218	66.93	49.97	58.45	71.45 a	58.03 ghijk	64.74
I-2363	62.13	59.08	60.61	66.55 abcdef	64.89 abcdefgh	65.72
I-2368	61.75	47.06	54.41	68.71 abcd	57.95 ghijk	63.33
I-2494	60.22	35.75	47.99	65.9 abcdefg	55.01 ijk	60.46
I-2581	61.46	55.11	58.29	67.41 abcde	65.71 abcdefgh	66.56
I-2583	62.31	47.39	54.85	67.68 abcde	61.46 cdefghij	64.57
I-2592	61.05	56.76	58.91	64.93 abcdefgh	62.82 bcdefghi	63.88
Línea 13 (Gen 19)	57.47	51.48	54.48	63.36 abcdefgh	61.89 bcdefghij	62.63
UCV-100	58.75	51.48	55.12	64.16 abcdefgh	62.11 bcdefghij	63.14
UCV-56	66.80	42.64	54.72	70.06 ab	50.91 k	60.49
UCV-88	60.85	47.92	54.39	68.33 abcd	57.88 ghijk	63.11
UCV-Línea 16	63.55	48.01	55.78	67.05 abcdef	58.15 ghijk	62.60
Promedio	61.44 a	49.25 b	55.35	67.11	59.32	63.21

Medias con una letra común no son estadísticamente diferentes (p=5)

Lectura SPAD

El valor SPAD (Soil Plant Analysis Development) es una unidad que genera el medidor de clorofila SPAD-502, el cual determina la cantidad relativa de clorofila presente en la hoja mediante la medida de la absorción de la hoja en dos rangos de longitudes de onda. La Clorofila tiene picos de absorción en regiones de azul (400-500 nm) y rojo (600-700 nm), sin transmitancia en la región cercana a la infrarroja (Manual Minolta SPAD 502).

El SPAD-502 mide la absorbancia de la hoja en la región roja y cercana a infrarrojo. Usando esas dos transmitancias, el medidor calcula un valor numérico SPAD (Soil Plant Analysis Development), en un rango de 0 a 80 el cual es proporcional a la cantidad de clorofila en la hoja (Manual Minolta SPAD 502).

Para este ensayo se obtuvieron valores promedios de Lectura SPAD de 39.36 en condiciones de riego y 44.17 en condiciones de sequía (Cuadro 16) y el análisis de varianza combinado mostró diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0.01$) entre ambos ensayos. Al igual que los resultados obtenidos en este trabajo, valores superiores de verdor en las hojas en condiciones de sequía han sido reportados por diversos autores. Los mismos señalan que dicho comportamiento puede deberse a una reducción del área foliar debido al déficit hídrico aumentando la concentración de pigmentos por unidad de superficie (Rosales-Serna *et al.*, 2004; Polania, 2011; Rao, 2013 y Trapp, 2015).

Trabajos similares han demostrado que no existe relación entre el grado de verdor y rendimiento en grano bajo condiciones de estrés por sequía (Rao, 2013 y Polania, 2011). Aun así, Acosta-Díaz *et al* (2004) indican que uno de los procesos fisiológicos más sensibles al déficit hídrico es el crecimiento celular, por lo que la sequía reduce el área foliar y acelera la senescencia de hojas maduras cuando ésta es severa. Igualmente, otros autores señalan que el hecho de que las hojas permanezcan más tiempo verdes, brinda a la planta una capacidad de llenado de semillas mayor que

aquellas que entran en senescencia mucho más rápido debido a la sequía (Muñoz-Perea et al., 2006; Singh, 2007).

A este respecto, cabe señalar que la respuesta de esta variable es sensible a la metodología utilizada con relación al tipo de sequía simulada y la intensidad de la misma. Rosales-Serna *et al* (2004) reportaron diferencias estadísticas para el grado de verdor al evaluar 4 genotipos de caraota entre condiciones de riego óptimo y sequía de tipo intermitente. Sin embargo, no obtuvo diferencias estadísticas entre condiciones de humedad al evaluar los mismos genotipos bajo condiciones de sequía terminal (suspensión del riego a los 38 dds).

El análisis combinado también mostró diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0.01$) para la interacción Genotipo x Ambiente, indicando que la respuesta de los genotipos ante la condición de sequía no es igual para todos. La prueba de medias muestra que los genotipos 'Tacarigua', 'Tiziú', I-2041, I-2363, I-2494, I-2583, UCV-56, UCV-88 y UCV-Línea 16 aumentaron el grado de verdor ante condiciones de estrés mientras que el resto no presenta diferencias significativas entre ambas condiciones ambientales.

De este grupo, los genotipos con mayor grado de verdor expresado en condiciones de sequía fueron UCV-Línea 16, I-2583 y 'Tiziú' con valores de Lectura SPAD de 48.67, 47.59 y 47.56 respectivamente. Estos valores son superiores a los obtenidos por otros trabajos, donde el valor máximo de lectura SPAD reportado para esta especie ha sido 46.7, 44.4 y 43.6 en los trabajos publicados por Rosales-Serna *et al* (2004), Polania (2011) y Rao (2013), respectivamente.

Cuadro 21. Prueba de Medias de Duncan para la variable Lectura SPAD.

Genotipo	Lectura SPAD		
	Riego	Sequía	Promedio
‘Manuare’	40.22 efghijk	44.55 abcdef	42.39
‘Tacarigua’	39.44 fghijk	46.02 aabc	42.73
‘Tiziú’	35.66 k	47.56 a	41.61
I-1997	38.09 hijk	41.72 bcdefghij	39.91
I-2011	39.18 fghijk	37.37 ijk	38.28
I-2019	41.46 bcdefghij	43.94 abcdefg	42.70
I-2041	39.96 efghijk	46.64 abc	43.30
I-2155	41.34 bcdefghij	43.6 abcdefgh	42.47
I-2216	37.78 ijk	42.06 bcdefghi	39.92
I-2218	40.27 defghijk	41.16 cdefghij	40.72
I-2363	39.67 efghijk	46.21 abc	42.94
I-2368	40.79 cdefghijk	44.44 abcdef	42.62
I-2494	39.02 fghijk	45.03 abcde	42.03
I-2581	39.88 efghijk	44.16 abcdefg	42.02
I-2583	39.77 efghijk	47.59 a	43.68
I-2592	40.03 efghijk	39.11 fghijk	39.57
Línea 13 (Gen 19)	39.65 efghijk	41.84 bcdefghij	40.75
UCV-100	40.85 cdefghijk	44.16 abcdefg	42.51
UCV-56	36.35 jk	45.7 abcd	41.03
UCV-88	38.28 hijk	46 abc	42.14
UCV-Línea 16	38.88 ghijk	48.67 a	43.78
Promedio	39.36	44.17	41.76

Medias con una letra común no son estadísticamente diferentes ($p=0.05$)

VI. Variables Agronómicas

Rendimiento

En términos generales, la producción por planta y el rendimiento estimado presentaron valores superiores en condiciones de riego, valores esperados teniendo en cuenta el tipo y la intensidad de sequía aplicada. Así mismo, los valores mínimos y máximos observados para cada variable en condiciones de riego y sequía evidencian

una gran variabilidad en cuanto a la respuesta de los distintos genotipos evaluados en este trabajo (Cuadro 22).

Cuadro 22. Estadísticos descriptivos para las variables Gr por planta y Rendimiento estimado ($\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Variables	Ensayo	Media	Mín	Máx	Asimetría	Kurtosis	Normalidad
Gr por planta	Riego	17.14 ± 4.86	7.73	33.79	0.62	0.86	0.97
	Sequía	7.38 ± 4.21	1.61	23.02	1.1	1.75	0.91
Rendimiento estimado ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Riego	1885.19 ± 534.67	850.15	3717.36	0.62	0.86	0.97
	Sequía	811.73 ± 463.10	177.1	2532.72	1.1	1.76	0.91

El Cuadro 23 muestra el análisis de varianza realizado por ambiente. Para las variables gr por Planta y Rendimiento estimado existieron diferencias estadísticas solo para la condición de estrés por sequía mas no para la condición de riego. El comportamiento similar de los genotipos bajo condiciones óptimas de riego indica que todos tienen un buen potencial de rendimiento y que el mismo puede ser expresado bajo condiciones favorables de manejo. De hecho, todos superaron los $1300 \text{ Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ en el ensayo de riego con una media de $1885.19 \text{ Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Cuadro 26).

Cabe destacar que los genotipos utilizados para este ensayo fueron previamente seleccionados en base a su productividad y adaptabilidad especialmente bajo condiciones ambientales favorables. El hecho de que solo existieran diferencias significativas para la condición de estrés indica la importancia de considerar la respuesta individual de cada genotipo a condiciones diferentes de manejo, asemejando las condiciones de producción del agricultor a fin de reducir las brechas de rendimiento entre los obtenidos bajo condiciones experimentales y los rendimientos reales.

Los resultados obtenidos de la prueba de homogeneidad de varianzas permitió la realización del análisis combinado para estas variables (Cuadro 24). El análisis de varianza combinado permitió evaluar el efecto de la sequía sobre estas variables, las

cuales resultaron muy afectadas por el estrés inducido al momento de floración y llenado de grano con una significancia estadística de $p < 0.01$ (Cuadro 25). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por muchos autores, evidenciando el efecto negativo de la sequía sobre la producción por planta (Moyeja, 1997; Acosta-Díaz *et al.*, 2004; Rosales-Serna *et al.*, 2004; Beebe *et al.*, 2008; Rodríguez *et al.*, 2009; Mayor, 2010; Polania, 2011; Riveiro, 2012; Rao, 2013; Trapp, 2015 y Chantiro *et al.*, 2016).

Cuadro 23. Análisis de varianza por ambiente para las variables Gr por planta y Rendimiento estimado (Kg.ha^{-1}).

FV	gl	Gr por Planta		Rendimiento estimado	
		Riego	Sequía	Riego	Sequía
Bloque	2	242.29**	255.48**	2931406.79**	3092178.75**
Genotipo	20	15.55ns	20.46**	188129.08ns	247660.75**
Error	40	16.73	4.46	202474.33	53969.88
Total	62				
CV (%)		23.87	28.63	23.87	28.62

* y ** indican diferencias significativas con un valor de $p < 0.05$ y $p < 0.01$ respectivamente; ns: diferencias estadísticas no significativas.

Cuadro 24. Prueba de homogeneidad de varianzas de Hartley para las variables Gr por Planta y Rendimiento estimado (Kg.ha^{-1}).

Cuadrado Medio del Error	Gr por Planta		Rendimiento estimado
	Riego	16.73	202474.33
Sequía	4.46	53969.88	
Prueba de Hartley	3.75	0.27	

Cuadro 25. Análisis de varianza combinado para las variables Gr por Planta y Rendimiento estimado (Kg.ha⁻¹).

FV	gl	Gr por Planta	Rendimiento estimado
Ambiente	1	3000.03**	36298352.15**
Ambiente>Bloque	4	248.89**	3011792.77**
Genotipo	20	26.90**	325599.73**
Genotipo*Ambiente	20	9.11ns	110190.10ns
Error	80	10.6	128222.11
Total	125		
CV(%)		26.55	26.55

* y ** indican diferencias significativas con un valor de $p < 0.05$ y $p < 0.01$ respectivamente; ns : diferencias estadísticas no significativas.

Para la variable Gr por planta se obtuvieron valores promedios de 17.14 gr.planta⁻¹ y 7.38 gr.planta⁻¹ para las condiciones de riego y estrés, respectivamente (Cuadro 22). Chantiro *et al* (2016) reportaron valores muy similares a los obtenidos en este trabajo al obtener promedios de 17.39 gr en condiciones de riego y 9.44 gr en condiciones de sequía, lo equivalente a una reducción del 45.72%. Igualmente, Rosales-Serna *et al* (2004) obtuvieron una reducción en los gr por planta del 37% y 49% bajo sequía terminal en dos localidades, al pasar de 35.8 gr.planta⁻¹ a 18.2 gr.planta⁻¹ en la primera localidad y 18.9 gr.planta⁻¹ a 11.9 gr.planta⁻¹ en la segunda localidad.

El Rendimiento estimado fue calculado en base a la producción por planta obtenida por genotipo para la densidad de siembra utilizada, 110.000 pl.ha⁻¹. Bajo condiciones de riego se obtuvo un promedio de 1885.19 kg.ha⁻¹ mientras que para sequía 811 kg.ha⁻¹. Tosquy-Valle *et al* (2014) reportaron promedios de 1879.57 kg.ha⁻¹ bajo condiciones de riego y 1101.65 kg.ha⁻¹ en condiciones de sequía, una reducción del 41% del rendimiento al evaluar 25 genotipos de grano negro en México. Así mismo, resultados similares han sido obtenidos en distintos trabajos realizados en Colombia. Por ejemplo, Rao (2013) reportó valores de rendimientos promedios de 960 kg.ha⁻¹ en riego y 661 kg.ha⁻¹ en sequía al evaluar 36 genotipos. Polania (2011) obtuvo una

reducción del 61% al obtener valores de 2516 kg.ha⁻¹ en condiciones óptimas de riego y 986 kg.ha⁻¹ en condiciones de sequía terminal al evaluar 21 genotipos de caraota y Mayor (2010) obtuvo valores de 2521.9 kg.ha⁻¹ en riego y 719.4 kg.ha⁻¹ en sequía, lo equivalente a un % de reducción del rendimiento del 71%.

Los resultados obtenidos en este trabajo corroboran lo comentado por los autores citados anteriormente, quienes consideran la sequía como la segunda causa más importante en la reducción del rendimiento para este cultivo, después de la incidencia de plagas y enfermedades (Acosta-Díaz *et al.*, 2004; Polania *et al.*, 2012; Chantiro *et al.*, 2016). El genotipo que mostró mayor rendimiento en ambas condiciones fue UCV-56 con 2043.12 Kg.ha⁻¹ seguido de los genotipos UCV-Línea 16, I-2581, I-2583, I-2041, I-2216, Línea 13 (Gen 19), I-2368 e I-2011 con 1593.46, 1587.65, 1558.29, 1517.37, 1478.95, 1404.71, 1365.92 y 1349.11 Kg.ha⁻¹, respectivamente. Estos genotipos superan la media general del ensayo de 1348.46 Kg.ha⁻¹. El genotipo que presentó mayores rendimientos bajo condiciones de estrés fue UCV-56 con 1692.49 Kg.ha⁻¹ seguido de los genotipos I-2583, I-2581 y I-2041 los cuales superaron los 1000 Kg.ha⁻¹ con valores de 1140.41, 1090.02 y 1054.11 Kg.ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 26).

El genotipo UCV-56 presentó los mejores rendimientos tanto en condiciones de riego como en condiciones de sequía, indicando su alta capacidad productiva la cual es expresada en ambas condiciones de humedad. Igualmente, sobresalen los cultivares locales I-2583 e I-2581 quienes presentaron rendimientos de 1140.41 y 1090.02 Kg.ha⁻¹ bajo estrés (Cuadro 26). Por otro lado, el genotipo que presentó menor rendimiento en ambos ensayos fue UCV-100 con un promedio de 991.19 Kg.ha⁻¹. Sin embargo, bajo la condición de sequía el genotipo más afectado fue 'Tacarigua' con un rendimiento de 417.98Kg.ha⁻¹ (Cuadro 26).

No se obtuvieron diferencias estadísticas significativas para la interacción Genotipo x Ambiente, lo cual indica que todos los genotipos se vieron afectados de forma negativa por la sequía. Sin embargo se observan tendencias interesantes al considerar el % de reducción de su comportamiento productivo.

Cuadro 26. Prueba de medias de Duncan para las variables Gr por planta y Rendimiento estimado (Kg.ha⁻¹).

Genotipo	Gr por Planta				Rendimiento estimado				
	Riego	Sequía	Promedio		Riego	Sequía	Promedio	% RD	
‘Manuare’	15.52	5.42	10.5	bc	1706.8	596.8	1151.8	bc	65.0
‘Tacarigua’	16.17	3.8	10.0	bc	1779.2	418.0	1098.6	bc	76.5
‘Tiziú’	15.07	8.96	12.0	bc	1657.1	985.7	1321.4	bc	40.5
I-1997	15.25	5.65	10.5	bc	1677.4	621.1	1149.2	bc	63.0
I-2011	19.16	5.37	12.3	bc	2107.4	590.9	1349.1	bc	72.0
I-2019	16.3	7.56	11.9	bc	1793.0	831.5	1312.3	bc	53.6
I-2041	18.01	9.58	13.8	b	1980.6	1054.1	1517.4	b	46.8
I-2155	15.76	4.26	10.0	bc	1733.7	468.3	1101.0	bc	73.0
I-2216	20.45	6.45	13.5	bc	2248.7	709.2	1479.0	bc	68.5
I-2218	16.01	5.05	10.5	bc	1760.9	555.5	1158.2	bc	68.5
I-2363	15.39	7.81	11.6	bc	1692.6	858.7	1275.6	bc	49.3
I-2368	16.99	7.85	12.4	bc	1868.9	863.0	1365.9	bc	53.8
I-2494	16.08	6.01	11.0	bc	1769.3	660.5	1214.9	bc	62.7
I-2581	18.96	9.91	14.4	b	2085.3	1090.0	1587.7	b	47.7
I-2583	17.96	10.37	14.2	b	1976.2	1140.4	1558.3	b	42.3
I-2592	17.94	5.96	12.0	bc	1974.0	655.9	1314.9	bc	66.8
Línea 13 (Gen 19)	19.22	6.32	12.8	bc	2114.0	695.4	1404.7	bc	67.1
UCV-100	11.88	6.14	9.0	c	1307.3	675.1	991.2	c	48.4
UCV-56	21.76	15.38	18.6	a	2393.7	1692.5	2043.1	a	29.3
UCV-88	15.9	8.28	12.1	bc	1749.1	910.6	1329.8	bc	47.9
UCV-Línea 16	20.12	8.85	14.5	b	2213.8	973.2	1593.5	b	56.0
Promedio	17.14 a	7.38 b	12.3		1885.19 a	811.73 b	1348.5		57.1

RD: Reducción del rendimiento. Medias con una letra común no son estadísticamente significativas (p=0.05)

La figura 5 muestra de manera gráfica la representación de esta variable la cual se relaciona con la tolerancia a las condiciones de sequía ya que es independiente a la capacidad productiva de la planta. En la misma se observa que existen diferencias en el cambio de magnitud de la interacción entre los genotipos para el rendimiento. Por ejemplo, el genotipo UCV-56 sobresale al presentar tanto los mayores rendimientos en ambas condiciones como el menor % de reducción ante el estrés al compararlo con el resto de los genotipos evaluados. Así mismo, los genotipos más afectados fueron aquellos que presentaron un mayor % de reducción del rendimiento, entre los cuales se encuentran ‘Tacarigua’, I-2155 e I-2011 con valores de 76.5%, 73% y 72%, respectivamente.

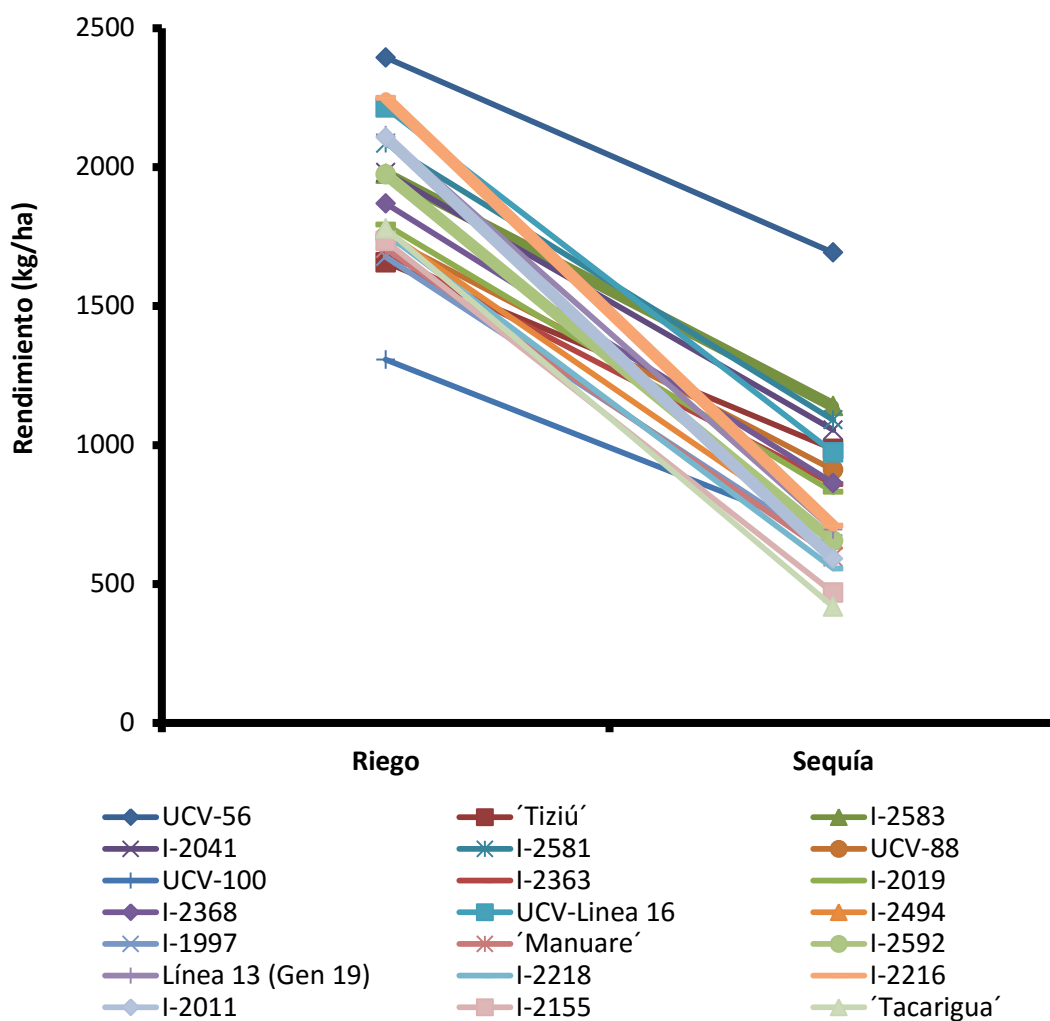


Figura 5. Rendimiento en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ bajo condiciones de riego y sequía de 21 genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.).

Componentes de Rendimiento

Los componentes de rendimiento Vainas por planta, Semillas por vaina y Peso de 100 semillas disminuyeron en el ensayo de sequía (Cuadro 27). Sin embargo, solo la variable Semillas por Vaina presentó una reducción significativa al pasar de 5.01 en condiciones de riego a 2.51 en condiciones de estrés (Cuadro 27).

En cuanto al número de Vainas por planta se observaron valores máximos superiores en el ensayo de sequía, a pesar de que los valores promedios indican una pequeña

superioridad bajo condiciones de riego. Esto se debe a respuestas específicas de algunos genotipos, los cuales tuvieron la capacidad de producir una mayor cantidad de vainas en respuesta al riego aplicado una vez culminado el periodo de sequía, teniendo una mayor capacidad de recuperación al inducir nuevamente un desarrollo reproductivo generando nuevas flores y vainas (Mukeshimana *et al.*, 2014).

Cuadro 27. Estadística descriptiva para las variables Vainas por Planta, Semillas por Vaina y Peso de 100 semillas.

Variables	Ensayo	Media	Mín	Máx	Asimetría	Kurtosis	Normalidad
Vainas por Planta	Riego	18.08 ± 4.55	9.67	28.67	0.42	-0.43	0.95
	Sequía	17.03 ± 10.67	4.33	51.67	1.22	1.16	0.91
Semillas por Vaina	Riego	5.01 ± 0.8	2.71	6.58	-0.53	0.46	0.96
	Sequía	2.51 ± 0.54	1.05	4.23	0.31	1.03	0.99
Peso de 100 semillas (gr)	Riego	19.30 ± 3.74	14.51	35.92	2.58	1.12	0.9
	Sequía	18.45 ± 4.42	11.14	35.54	1.39	2.84	0.92

Para el Peso de 100 semillas se obtuvieron promedios similares en ambos ensayos, 19.30 gr en riego y 18.45 gr en sequía. Cabe destacar que los valores máximos para esta variable en ambos ensayos estuvieron en un rango de 35.54 a 35.92, correspondientes al cultivar local I-2592 de semillas grandes color rojo, el cual presentó valores muy similares en ambos tratamientos de humedad.

El análisis de varianza por ambiente mostró diferencias estadísticas entre los genotipos dentro de cada ensayo para todos los componentes de rendimiento evaluados (Cuadro 28). Los cuadrados medios del error de cada ensayo fueron utilizados para realizar la prueba de homogeneidad de varianzas, lo cual permitió realizar el análisis combinado (Cuadro 29).

De acuerdo a los resultados de este análisis, solamente la variable número de Semillas por vaina mostró una diferencia entre ambientes altamente significativa ($p < 0.01$). De hecho, la reducción debido al estrés fue de un 50% para esta variable. Resultados

similares fueron obtenidos por Moyeja (1997), quien reportó una reducción del 32% en el cultivar ICA-PIJAO al ser sometido a condiciones de estrés hídrico. Igualmente, Chantiro *et al* (2016) reportaron una reducción del 21% en el número de semillas por vainas en sequía, atribuyendo este comportamiento a una disminución en la capacidad de movilización de foto-asimilados hacia la formación de semillas. Por otro lado, los componentes de rendimiento Vainas por planta y Peso de 100 semillas no mostraron diferencias estadísticas significativas entre las condiciones de riego y sequía, aunque presentaron promedios inferiores bajo la condición de estrés.

Cuadro 28. Análisis de varianza por ambiente para las variables Vainas por Planta, Semillas por Vaina y Peso de 100 semillas.

FV	gl	Vainas por Planta		Semillas por Vaina		Peso de 100 semillas	
		Riego	Sequía	Riego	Sequía	Riego	Sequía
Bloque	2	159.05**	1051.37**	2.14**	0.69*	6.57ns	12.23ns
Genotipo	20	24.06*	173.42**	0.95*	0.4*	33.56**	45.62**
Error	40	12.11	37.34	0.41	0.21	4.59	6.9
Total	62						
CV (%)		19.24	35.88	12.78	18.38	11.1	14.24

* y ** indican diferencias significativas con un valor de $p < 0.05$ y $p < 0.01$ respectivamente; ns : diferencias estadísticas no significativas

Cuadro 29. Prueba de homogeneidad de varianzas de Hartley para las variables Vainas por Planta, Semillas por Vaina y Peso de 100 semillas.

Cuadrado Medio del Error		Vainas por Planta	Semillas por Vaina	Peso de 100 semillas
		Riego	12.11	0.41
	Sequía	37.34	0.21	6.9
Prueba de Hartley		3.08	1.95	1.50

Para la variable Peso de 100 semillas se observó una reducción promedio de tan solo un 4.4%. Resultados muy similares fueron obtenidos por Rao (2013), quien obtuvo

valores de 19.2 gr en condiciones de riego y 18.3 gr en condiciones de sequía, mostrando una reducción del 4.6%. Así mismo, Rodríguez *et al* (2009), no observaron diferencias entre los promedios obtenidos de 64 genotipos en condiciones de riego y sequía con valores de 24.23 gr y 24.73 gr, respectivamente.

Para la variable Vainas por Planta se obtuvieron promedios de 18.08 vainas en riego y 17.03 vainas en sequía, el equivalente a una reducción del 5.8%. Esta variable es considerada como uno de los componentes de rendimiento que más explican la producción total de una planta (Tosquy-Valle *et al.*, 2014). Igualmente, distintos autores señalan que esta variable es la más afectada por condiciones limitadas de humedad (Rao, 2013; Polania, 2011; Tosquy-Valle *et al.* 2014) y por ende es la responsable de la reducción del rendimiento bajo condiciones de estrés por sequía. Sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo difieren de lo reportado por dichos autores.

Tosquy-Valle *et al* (2014) y Chantiro *et al* (2016) obtuvieron una reducción promedio del 30% en el número de vainas por plantas cuando los genotipos eran sometidos a déficit hídrico en etapa de floración y llenado de vainas. Es importante señalar que en estos trabajos no fue contemplada la reincorporación del riego, mientras que en este trabajo el mismo se reintegró a los 53 dds, lo cual permitió a la mayoría de los genotipos en estudio producir nuevas flores y vainas, como se comentó anteriormente.

Este aspecto, relacionado a la metodología utilizada puede explicar dichos resultados teniendo en cuenta que la reducción en el número de vainas por plantas puede deberse a la aborción de óvulos o polen en individuos bajo estrés (Kokobun *et al.* 2001). Adicionalmente, Chantiro *et al.* (2016) indican que la reducción de esta variable también se debe al incremento en la producción de etileno inducido por la sequía, causando la aborción de flores. Es por ello que la poca reducción promedio obtenida en este trabajo puede deberse a la capacidad de recuperación de algunos genotipos como bien ha sido reportado por otros autores (Mukechimana *et al.*, 2014).

La interacción Genotipo x Ambiente para los componentes de rendimiento Vainas por planta y Semillas por vaina fueron altamente significativas ($p < 0.01$), evidenciando variabilidad en cuanto a la respuesta de los genotipos ante el efecto de la sequía (Cuadro 30). Dicha interacción puede permitir identificar cultivares tolerantes a dicho estrés.

Cuadro 30. Análisis de varianza combinado para las variables Vainas por Planta, Semillas por Vaina y Peso de 100 semillas.

FV	gl	Vainas por Planta	Semillas por Vaina	Peso de 100 semillas
Ambiente	1	34.62 ns	197.75**	22.72ns
Ambiente>Bloque	4	605.21**	1.41**	9.40ns
Genotipo	20	126.59**	0.67**	70.26**
Genotipo*Ambiente	20	70.89**	0.68**	8.93ns
Error	80	24.72	0.31	5.75
Total	125			
CV(%)		28.32	14.84	12.7

* y ** indican diferencias significativas con un valor de $p < 0.05$ y $p < 0.01$ respectivamente; ns : diferencias estadísticas no significativas.

Los genotipos mostraron una respuesta diferencial contrastante en la producción de Vainas por planta bajo condiciones de estrés (Cuadro 31). Los genotipos más afectados fueron el cultivar local I-2218 y Línea 13 (Gen 19) con una reducción del 61% y 54%, respectivamente, llegando a producir 7.78 vainas por planta para el primer caso y 9.33 para el segundo, mostrando diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) con relación a su testigo en condiciones de riego. Adicionalmente, ‘Manuare’, ‘Tacarigua’, I-2155, I-2216, I-2363, I-2494, I-2592 y UCV-Línea 16 presentaron valores por debajo de la media del ensayo de sequía (17.03). Estos mismos también fueron inferiores a su comportamiento en condiciones de riego.

Por otro lado, los genotipos I-2583, I-2019 y UCV-56 también mostraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre ambas condiciones. Sin embargo, presentaron valores superiores bajo estrés por sequía, llegando a producir un 27% más

de vainas por plantas en el caso de I-2583, 66% más en el caso de I-2019 y un 65% más en el caso de UCV-56. Para el resto de los genotipos se observaron valores ligeramente superiores a los expresados bajo condición de riego, pero no mostraron diferencias estadísticas significativas entre ambas condiciones.

Es interesante destacar que aquellos genotipos que disminuyeron de manera significativa el número de vainas por plantas presentaron un aumento sustancial en el peso de 100 semillas bajo condiciones de estrés. Por ejemplo, I-2218 paso de 15.5 gr en el ensayo de riego a 19.87 gr en el ensayo de sequía, un aumento del 28%. Lo mismo ocurrió con Línea 13 (Gen 19) quien paso de 19.8 en el ensayo de riego a 21.88 en el ensayo de sequía, lo equivalente a un 15% de aumento (Cuadro 31).

De igual forma, esta compensación en los componentes de rendimiento fue observada en aquellos genotipos que aumentaron de manera significativa el número de vainas por planta bajo condición de sequía. En este caso el genotipo I-2583 presentó una reducción del 19% en el peso de 100 semillas, mientras que I-2019 presentó una reducción del 23% y UCV-56 una reducción del 15%. Estos valores pueden ser considerados significativos teniendo en cuenta que en promedio la reducción del peso de 100 semillas para todos los genotipos fue de un 4.3%. Un comportamiento similar fue observado para casi todos los demás genotipos, aunque en una menor magnitud.

Resultados similares fueron observados por Moyeja (1997) quien señalo que el genotipo EMP-192 presentó una reducción en el número de vainas por planta de 32.2% mientras que el genotipo DOR-227 aumentó la producción de vainas en un 15.40% bajo condiciones de estrés. Sin embargo, EMP-192 presentó la menor reducción del peso de 100 semillas con un 0.97% mientras que DOR-227 presentó una reducción del 11.42%. Igualmente, Polon *et al* (2013) evaluaron por 4 años el comportamiento del genotipo 'Tomeguín 93' bajo distintos niveles de intensidad de sequía obteniendo como resultado que al aumentar los niveles de sequía aumentaba la producción de vainas por planta. Sin embargo, el efecto de compensación no pudo ser observado en esta revisión debido a que solamente ese componente de rendimiento fue el evaluado por los autores. La compensación entre el número de vainas por planta

y el peso de 100 semillas fue reportada por Rao (2013) al evaluar genotipos de *Phaseolus acutifolius*, indicando que esta respuesta confiere plasticidad fenotípica ante distintas condiciones ambientales, incluyendo el estrés por sequía.

Cuadro 31. Prueba de medias de Duncan para las variables Peso de 100 semillas y Vainas por Planta.

Genotipo	Peso de 100 Semillas			Vainas por Planta					
	Riego	Sequía	Promedio	Riego	Sequía	Promedio			
‘Manuare’	17.34	18.94	18.14	bcdefgh	16.22	cdefghi	11.11	fghi	13.67
‘Tacarigua’	19.99	20.88	20.43	bcde	14	defghi	8.44	hi	11.22
‘Tiziú’	16.87	12.92	14.89	h	21.11	bcdef	23.67	bcd	22.39
I-1997	19.17	17.19	18.18	bcdefgh	13.78	defghi	15.56	defghi	14.67
I-2011	18.5	15.67	17.09	fgh	17.44	cdefghi	16	cdefghi	16.72
I-2019	20.48	15.88	18.18	bcdefgh	18	cdefgh	29.83	ab	23.92
I-2041	21.93	20.42	21.18	b	17.34	cdefghi	20.28	bcdef	18.81
I-2155	17.69	16.99	17.34	efgh	15.33	defghi	9.67	ghi	12.50
I-2216	17.55	20.07	18.81	bcdefg	19.56	cdefg	11.11	fghi	15.34
I-2218	15.47	19.87	17.67	cdefgh	19.89	cdef	7.78	i	13.84
I-2363	21	18.42	19.71	bcdef	17.55	cdefghi	15.33	defghi	16.44
I-2368	18.15	16.87	17.51	defgh	19.78	cdef	18.11	cdefgh	18.95
I-2494	18.05	18.97	18.51	bcdefg	17.89	cdefgh	13.06	efghi	15.48
I-2581	18.24	17.15	17.7	cdefgh	20.56	bcdef	19.78	cdef	20.17
I-2583	17.79	14.46	16.13	gh	20.44	bcdef	25.91	bc	23.18
I-2592	32.35	31.62	31.99	a	12.67	efghi	8.56	hi	10.62
Línea 13 (Gen 19)	19.84	21.88	20.86	bc	20.48	bcdef	9.33	hi	14.91
UCV-100	17.84	15.09	16.47	fgh	14.67	defghi	20.33	bcdef	17.50
UCV-56	19.69	16.76	18.23	bcdefg	22.11	bcde	36.57	a	29.34
UCV-88	17.85	15.49	16.67	fgh	18.22	cdefgh	21.42	bcde	19.82
UCV-Línea 16	19.55	21.95	20.75	bcd	22.64	bcde	15.81	defghi	19.23
Promedio	19.30	18.45	18.88		18.08		17.03		17.56

Medias con una letra común no son estadísticamente significativas ($p < 0.05$)

El número de semillas por vaina fue el componente de rendimiento que más fue afectado por el estrés de sequía aplicado al causar una reducción del 50% en comparación con el comportamiento observado en el ensayo de riego. Aun así, el análisis combinado mostro diferencias estadísticas significativas para la interacción Genotipo x Ambiente. En el Cuadro 32 se presentan los valores promedios obtenidos en cada ensayo y los resultados de la prueba de medias. Aunque ningún genotipo fue capaz de mantener un comportamiento similar en ambas condiciones, los genotipos que presentaron mayor número de semillas por vaina en el ensayo de sequía fueron

‘Tiziú’, I-2581, Línea 13 (Gen 19), I-2218, I-2363, I-2368, , I-2583, e I-2216 con valores de 2.98, 2.97, 2.92, 2.92, 2.78, 2.78, , 2.79, y 2.71 , respectivamente. Así mismo, el cultivar local I-2019 presento los menores valores con 1.54 semillas por vaina.

Los resultados en este trabajo son contrarios a los obtenidos por Chantiro *et al* (2016) quien indicó que el número de semillas por vaina es el componente de rendimiento menos afectado por la sequía. Lo mismo fue reportado por Tosquy-Valle *et al* (2014) quienes obtuvieron una reducción debido a la sequía de un 7% para esta variable.

Cuadro 32. Prueba de medias de Duncan para la variable Semillas por Vaina.

Genotipo	Semillas por Vaina				
	Riego	Sequía	Promedio		
‘Manuare’	5.43	abcde	2.38	gh	3.91
‘Tacarigua’	5.78	abc	2.18	gh	3.98
‘Tiziú’	4.26	f	2.98	g	3.62
I-1997	5.71	abcd	2.11	gh	3.91
I-2011	6.1	a	2.47	gh	4.29
I-2019	4.29	f	1.54	h	2.92
I-2041	4.92	bcdef	2.27	gh	3.60
I-2155	5.78	abc	2.63	gh	4.21
I-2216	5.91	ab	2.71	g	4.31
I-2218	5.16	abcdef	2.92	g	4.04
I-2363	4.47	ef	2.78	g	3.63
I-2368	4.69	def	2.78	g	3.74
I-2494	5.01	bcdef	2.21	gh	3.61
I-2581	5.03	bcdef	2.97	g	4.00
I-2583	4.87	bcdef	2.79	g	3.83
I-2592	4.45	ef	2.21	gh	3.33
Línea 13 (Gen 19)	4.68	def	2.92	g	3.80
UCV-100	4.47	ef	2.16	gh	3.32
UCV-56	4.77	cdef	2.47	gh	3.62
UCV-88	4.84	bcdef	2.5	gh	3.67
UCV-Línea 16	4.62	ef	2.62	gh	3.62
Promedio	5.01		2.50		3.76

Medias con una letra común no son estadísticamente significativas (p=0.05)

VII. Índices de Sequía para variables con interacción genotipo x ambiente.

Como se ha comentado anteriormente, la tolerancia a la sequía y la productividad en condiciones de sequía son dos fenómenos totalmente independientes condicionados por aspectos genéticos distintos (Rodríguez *et al.*, 2009). Por un lado, la tolerancia se presenta cuando un genotipo es capaz de mantener su capacidad productiva, medida en condiciones de riego, al enfrentarse a condiciones de estrés por déficit hídrico. Esta tolerancia es independiente a la productividad *per sé* de un genotipo y su expresión es un indicativo de la presencia de mecanismos de tipo fisiológico, morfológico y/o fenológico asociados a un mayor uso efectivo del agua o a una mayor capacidad de mantener el potencial hídrico de la planta bajo estrés.

Por otro lado, una mayor productividad en condiciones de sequía puede estar relacionada a la capacidad productiva *per sé* de un genotipo, excluyendo la presencia de mecanismos de tolerancia, la cual, a pesar de ser afectada por el déficit hídrico, sigue siendo considerada alta. Por ejemplo, Polania (2011) al evaluar el genotipo SER-78 en ambas condiciones de humedad, obtuvo que el mismo presentó una reducción del rendimiento del 42% al pasar de 2360 kg.ha⁻¹ a 1360 kg.ha⁻¹. Sin embargo, a pesar de la alta reducción del mismo, dicho genotipo fue el más productivo bajo la condición de estrés en un total de 21 variedades evaluadas.

Al ser fenómenos independientes es posible obtener distintas combinaciones producto de su interacción: alta tolerancia con baja productividad, baja tolerancia con alta productividad, baja tolerancia y baja productividad y por último alta tolerancia y alta productividad. Esta última combinación es la más interesante, ya que según referencias de investigadores del CIAT es la combinación perfecta de los cultivares mejorados para zonas afectadas por la sequía. Aun así, la identificación de genotipos tolerantes o con alta productividad en sequía puede ser un insumo valioso para los programas de mejoramiento genético en el país.

Para evaluar la tolerancia de los 21 genotipos de caraota al estrés por sequía, se calculó el Índice relativo a la sequía (RDI). Por otro lado, para evaluar la capacidad

productiva de los genotipos fueron utilizados los siguientes índices: Índice de la media aritmética (MP), Índice de la media geométrica (GMP) y el Índice de la media armónica (HM). Los mismos fueron aplicados a las variables agronómicas, fisiológicas y fenológicas que presentaron diferencias estadísticas para la interacción Genotipo x Ambiente.

Variables Agronómicas

El cálculo de los índices de sequía fue realizado para los componentes de rendimiento Vainas por planta y Semillas por vaina. En relación al primero, se observaron diferencias estadísticas entre los genotipos para todos los índices, tanto para el de tolerancia como para los de productividad (Cuadro 33).

Sin embargo, para la variable Semillas por vaina todos los índices de sequía calculados a excepción del RDI mostraron diferencias estadísticas significativas entre los genotipos.

El número de vainas por planta es considerado el componente de rendimiento más importante en la capacidad productiva de un genotipo (Rao, 2009). De hecho, es uno de los criterios de selección más usados en los programas de mejoramiento genético para este cultivo.

Por esta razón, aunque el rendimiento *per se* no pudo ser incluido para el cálculo de los índices de sequía, este componente puede ser un gran estimador del mismo a fin de seleccionar genotipos tolerantes y/o productivos ante el déficit hídrico.

Cuadro 33. Análisis de la varianza de los índices de sequía calculados para las variables Vainas por Planta y Semillas por vaina.

Variables	FV	gl	Índice de Tolerancia	Índices de Productividad		
			RDI	MP	GMP	HM
Vainas por Planta	Bloque	2	7.01**	109.7**	106.48**	109.64**
	Genotipo	20	0.51*	63.3**	58.99**	55.72**
	Error	40	0.22	12.76	11.04	11.38
	Total	60				
	CV (%)		46.42	20.35	20	21.4
Semillas por Vaina	FV	gl	RDI	MP	GMP	HM
	Bloque	2	0.11**	0.1 ns	0.01ns	0.18 ns
	Genotipo	20	0.03 ns	0.34**	0.33**	0.38*
	Error	40	0.02	0.13	0.13	0.16
	Total	60				
CV (%)		25.75	9.62	10.23	12.26	

RDI: Índice relativo a la sequía, MP: Índice de la media aritmética, GMP: Índice de la media geométrica, HM: Índice de la media armónica.,* y ** indican diferencias estadísticas significativas para un $p < 0.05$ y $p < 0.01$, respectivamente.

El índice relativo a la sequía (RDI) permitió identificar genotipos que logran mantener su capacidad productiva al enfrentarse al estrés. Los genotipos más tolerantes de acuerdo al RDI son UCV-56 y la variedad local I-2019, mientras que los más sensibles a la sequía fueron Línea-13 e I-2218.

En cuanto a los índices de productividad, el índice MP, GMP y HM mostraron resultados similares indicando que el genotipo con una mayor producción de vainas por planta fue UCV-56 seguido de I-2019. Así mismo, los genotipos menos productivos fueron ‘Tacarigua’ e I-2592 (Cuadro 34).

De tal manera que para esta variable fue posible identificar genotipos que presentaran tolerancia a la sequía y a su vez una alta productividad, siendo UCV-56 e I-2019 aquellos que presentaron esta combinación favorable e interesante, valiosa para los programas de mejoramiento genético.

Cuadro 34. Prueba de medias de Duncan de los índices de sequía para la variable Vainas por planta.

Genotipo	Índice de Tolerancia	Índices de Productividad		
	RDI	MP	GMP	HM
‘Manuare’	0.73 bc	13.66 def	12.89 ef	12.25 efg
‘Tacarigua’	0.62 bc	11.22 f	10.7 f	10.23 fg
‘Tiziú’	1.18 abc	22.39 bc	21.41 bc	20.5 abc
I-1997	1.4 ab	14.66 def	13.26 def	12.03 efg
I-2011	0.9 abc	16.72 cdef	16.36 cdef	16.04 bcdefg
I-2019	1.74 a	23.92 ab	23.03 ab	22.2 ab
I-2041	1.5 ab	18.81 bcde	17.74 bcde	16.79 bcdef
I-2155	0.63 bc	12.5 ef	12.17 ef	11.85 efg
I-2216	0.61 bc	15.33 def	14.2 def	13.23 defg
I-2218	0.4 c	13.83 def	12.23 ef	10.88 efg
I-2363	1.03 abc	16.45 cdef	15.71 cdef	15.04 cdefg
I-2368	0.97 abc	18.94 bcde	17.99 bcde	17.15 bcde
I-2494	0.77 bc	15.47 def	14.52 def	13.66 defg
I-2581	1.1 abc	20.17 bcd	19.53 bcd	18.92 bcd
I-2583	1.33 abc	23.18 abc	21.66 bc	20.29 abc
I-2592	0.69 bc	10.61 f	10.29 f	9.98 g
Línea 13 (Gen 19)	0.46 c	14.91 def	13.78 def	12.75 defg
UCV-100	1.5 ab	17.5 bcdef	16 cdef	14.69 cdefg
UCV-56	1.78 a	29.34 a	27.68 a	26.18 a
UCV-88	1.23 abc	19.82 bcd	19.57 bcd	19.31 bcd
UCV-Línea 16	0.76 bc	19.23 bcde	18.08 bcde	17.12 bcde

RDI: Índice relativo a la sequía, MP: Índice de la media aritmética, GMP: Índice de la media geométrica, HM: Índice de la media armónica. Medias con una letra común no son estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

En cuanto a la variable Semillas por vaina, no existieron diferencias estadísticamente significativas para el índice de tolerancia calculado. Para todos los genotipos evaluados los valores de RDI fueron menores a 1, indicando no solo que todos los

genotipos se comportaron de manera similar sino además que todos mostraron susceptibilidad a la sequía en cuanto a esta variable.

Para el caso de los índices de productividad, el índice MP permitió una mayor discriminación de los genotipos, siendo las variedades locales I-2011, I-2155 e I-2216 las más productivas en cuanto al número de semillas por vainas. A su vez, todos los índices de productividad lograron identificar al genotipo menos productivo para esta variable, el cual fue la variedad local I-2019 (Cuadro 35).

Es interesante destacar que aquellos genotipos que mostraron una mayor tolerancia y productividad en base a la variable Vainas por planta no corresponden a aquellos que tuvieron una mayor productividad para el caso de la variable Semillas por vaina. Este comportamiento puede atribuirse a la compensación de los componentes de rendimiento, donde un aumento sustancial del número de vainas por planta está relacionado a una reducción del número de semillas por vaina o viceversa. Aun así, poder identificar genotipos con distintas estrategias para mantener o aumentar su productividad en condiciones de estrés por sequía constituye un insumo importante para el desarrollo de nuevas y mejores variedades.

Cuadro 35. Prueba de medias de Duncan de los índices de sequía para la variable Semillas por vaina.

Genotipo	Índice de Tolerancia	Índices de Productividad			
	RDI	MP	GMP	HM	
‘Manuare’	0.44	3.9 bc	3.57 ab	3.28 abc	
‘Tacarigua’	0.38	3.98 bc	3.55 ab	3.16 abc	
‘Tiziú’	0.70	3.62 bc	3.56 ab	3.5 abc	
I-1997	0.37	3.91 bc	3.46 ab	3.07 abc	
I-2011	0.40	4.29 a	3.88 a	3.51 abc	
I-2019	0.43	2.92 d	2.48 c	2.14 d	
I-2041	0.46	3.59 bc	3.33 ab	3.1 abc	
I-2155	0.47	4.21 a	3.84 a	3.52 abc	
I-2216	0.46	4.31 a	4 a	3.71 ab	
I-2218	0.58	4.04 bc	3.82 a	3.63 abc	
I-2363	0.64	3.63 bc	3.51 ab	3.4 abc	
I-2368	0.59	3.74 bc	3.61 ab	3.49 abc	
I-2494	0.44	3.61 bc	3.33 ab	3.06 abc	
I-2581	0.59	3.99 bc	3.86 a	3.73 a	
I-2583	0.57	3.83 bc	3.69 ab	3.55 abc	
I-2592	0.54	3.33 bcd	3.09 b	2.88 c	
Línea 13 (Gen 19)	0.66	3.8 bc	3.57 ab	3.38 abc	
UCV-100	0.49	3.31 cd	3.11 b	2.91 bc	
UCV-56	0.54	3.62 bc	3.41 ab	3.22 abc	
UCV-88	0.52	3.68 bc	3.48 ab	3.3 abc	
UCV-Línea 16	0.57	3.63 bc	3.48 ab	3.34 abc	

RDI: Índice relativo a la sequía, MP: Índice de la media aritmética, GMP: Índice de la media geométrica, HM: Índice de la media armónica. Medias con una letra común no son estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Variables Fenológicas

Las variables fenológicas que fueron utilizadas para el cálculo de los índices de sequía fueron Días a floración y Días a madurez fisiológica. Todos los índices calculados, mostraron diferencias estadísticas significativas entre los genotipos para estas tres variables (Cuadro 36).

Cuadro 36. Análisis de la varianza para los índices de sequía calculados a las variables fenológicas Días a floración y Días a madurez fisiológica.

Variables	FV	gl	Índice de Tolerancia	Índices de Productividad		
			RDI	MP	GMP	HM
Días a Floración	Bloque	2	0.0015 ns	2.41**	2.40**	2.41**
	Genotipo	20	0.01**	18.99**	18.89**	18.81**
	Error	40	0.00078	0.37	0.36	0.36
	Total	60				
	CV (%)		2.78	1.51	1.51	1.5
Días a Madurez Fisiológica	FV	gl	RDI	MP	GMP	HM
	Bloque	2	0.0035**	2.35*	2.68*	3.03*
	Genotipo	20	0.01**	17.58**	17**	16.45**
	Error	40	0.00064	0.6	0.65	0.71
	Total	60				
CV (%)		2.24	0.95	0.99	1.04	

RDI: Índice relativo a la sequía, MP: Índice de la media aritmética, GMP: Índice de la media geométrica, HM: Índice de la media armónica.,* y ** indican diferencias estadísticas significativas para un $p < 0.05$ y $p < 0.01$, respectivamente.

En cuanto a la variable Días a floración, el índice RDI permitió discriminar entre genotipos que aumentan, mantienen o disminuyen los días a floración al enfrentarse a la condición de sequía. Si consideramos que una reducción (valores de $RDI < 1$) o un aumento (valores de $RDI > 1$) en los días a floración en condiciones de sequía forma parte de un mecanismo de respuesta de la planta ante el estrés (Mayor, 2010), aquellos genotipos que presenten valores similares en ambas condiciones (valores $RDI = 1$) pueden indicar posiblemente que los mismos no percibieron dicho estrés o por el contrario no expresaron una respuesta asociada a esta variable. Esta interpretación puede ajustarse solo al caso de las variables fenológicas evaluadas en este trabajo.

Como se observa en el Cuadro 37 podemos agrupar a la gran mayoría de los genotipos bajo esta última consideración, quienes no mostraron variación alguna ante el estrés. Estos resultados pueden deberse a que la suspensión del riego fue realizada cuando la gran mayoría de los genotipos había iniciado la floración. Aun así, UCV-Línea 16 e I-2583 presentaron el menor valor para RDI, indicando que dichos genotipos fueron sensibles a la condición de sequía respondiendo con una reducción en los días a floración. Por otro lado, el genotipo I-1997 presentó el mayor valor de RDI indicando un aumento en los días a floración (Cuadro 37).

Así mismo, los índices de productividad aplicados a esta variable mostraron resultados muy similares entre sí, mostrando que en términos generales los genotipos I-2041 y I-2011 tienden a ser los más tardíos y los genotipos I-2592 y 'Manaure' tienden a ser los más precoces. Para la variable Días a madurez fisiológica, el índice RDI permitió identificar al genotipo UCV-100 como el más tolerante, siendo el único distinto al resto de todos los genotipos. Con un valor de RDI de 1.02, dicho genotipo completó su ciclo fenológico en el mismo tiempo en ambas condiciones de humedad.

Para el resto de los genotipos, los valores de RDI mayores a 1 indican que bajo la condición de sequía, alargaron su ciclo, al aumentar el número de días para alcanzar la madurez fisiológica. Cabe destacar que el único genotipo que disminuyó su ciclo fenológico fue el cultivar local I-2592 (Cuadro 37). Los índices de productividad aplicados a esta variable mostraron resultados muy similares y su interpretación está relacionada con el tiempo promedio de un genotipo en alcanzar la madurez fisiológica en ambos ensayos. De esta manera es posible identificar genotipos que tienden a ser más precoces o más tardíos.

El índice MP logró una mayor discriminación entre los genotipos, siendo 'Tiziú' y UCV-Línea 16 los más tardíos con un promedio de 84 días. Dentro de los más precoces la variedad local I-2592 y las líneas avanzadas UCV-100 y UCV-56 con un promedio de 74, 78 y 79 días, respectivamente. Distintos autores señalan que genotipos que combinen precocidad con alta producción de grano tienen una ventaja

adaptativa frente a la sequía de tipo terminal ya que los mismos logran escapar a ella, ajustando su ciclo fenológico al periodo de mayor disponibilidad de agua (Polania, 2011; Mayor, 2010).

Cuadro 37. Prueba de medias de Duncan de los índices de sequía para la variable
Días a floración.

Genotipo	Índice de Tolerancia		Índices de Productividad					
	RDI		MP		GMP		HM	
‘Manuare’	1.04	bc	36	h	35.99	h	35.98	h
‘Tacarigua’	1.03	cd	39.83	ef	39.83	ef	39.82	ef
‘Tiziú’	0.97	efg	41.33	cd	41.33	cd	41.32	cd
I-1997	1.13	a	41.5	cd	41.42	cd	41.35	cd
I-2011	0.96	fgh	44.67	a	44.66	a	44.65	a
I-2019	1.08	b	42.67	b	42.63	b	42.6	b
I-2041	0.98	defg	44.17	a	44.17	a	44.16	a
I-2155	1.04	bc	37.67	g	37.64	g	37.62	g
I-2216	0.97	efg	39.33	f	39.33	f	39.32	f
I-2218	1.01	cdef	42	bc	42	bc	41.99	bc
I-2363	1.02	cde	39	f	39	f	38.99	f
I-2368	0.94	ghi	42	bc	41.98	bc	41.96	bc
I-2494	1	cdef	39	f	39	f	38.99	f
I-2581	0.98	defg	39.83	ef	39.83	ef	39.82	ef
I-2583	0.92	hi	41.17	cd	41.12	cd	41.08	cd
I-2592	1	cdef	35	i	35	h	35	h
Línea 13 (Gen 19)	0.99	cdef	40.5	de	40.5	de	40.49	de
UCV-100	1.04	bc	37.67	g	37.66	g	37.64	g
UCV-56	1.03	cd	37.17	g	37.16	g	37.15	g
UCV-88	1	cdef	39.33	f	39.33	f	39.33	f
UCV-Línea 16	0.9	i	42	bc	41.93	bc	41.87	bc

RDI: Índice relativo a la sequía, MP: Índice de la media aritmética, GMP: Índice de la media geométrica, HM: Índice de la media harmónica. Medias con una letra común no son estadísticamente diferentes ($p=0.05$).

Sin embargo, Acquah (2007) señala que dicha aseveración puede ser cierta solo en caso de que las condiciones ambientales donde se desarrollará el cultivo sean predecibles, es decir, cuando el patrón de precipitación y los episodios de sequía sean

definidos y constantes año tras año. Si por el contrario, el ambiente es altamente impredecible, como de hecho ocurre en la mayoría de las zonas tropicales y subtropicales producto de los efectos del cambio climático (Ceccarelli *et al.* 2009; Boyd y Rajakaruna, 2013), el uso de cultivares precoces puede ser una desventada debido a que el periodo de estrés podría ser inevitable (Acquah, 2007; Cardona-Ayala *et al.* 2013). Bajo estas condiciones, los cultivares que tienen una floración tardía pueden tener la oportunidad de recuperarse y continuar el crecimiento después del periodo de sequía (Acquah, 2007).

En otras palabras, un comportamiento fenológico precoz o tardío puede permitir a un genotipo escapar a los periodos de mayor intensidad de sequía. La variabilidad en la duración del ciclo fenológico, especialmente el ajuste del mismo en condiciones de estrés, corresponden a diferentes estrategias que pueden ser favorables en condiciones de sequía particulares. Así, los genotipos tolerantes al déficit hídrico serían aquellos que independientemente de su comportamiento fenológico (precoz o tardío) sean capaces de mantener su capacidad productiva.

Los resultados obtenidos en este trabajo evidencian la presencia de diferentes mecanismos asociados a la capacidad de acortar, alargar o mantener el ciclo fenológico. Esta diversidad es valiosa para los programas de mejoramiento genético, especialmente en el desarrollo de poblaciones básicas, brindando la oportunidad de desarrollar variedades con estrategias distintas que permitan tolerar la sequía.

Este enfoque es muy apropiado considerando que la tolerancia al déficit hídrico es un carácter elusivo, debido a la gran variabilidad de factores ambientales involucrados así como los cambios en magnitud e interacción entre ellos (Ceccarelli *et al.*, 2009).

Cuadro 38. Prueba de medias de Duncan de los índices de sequía para la variable
Días a madurez fisiológica.

Genotipo	Índice de Tolerancia		Índices de Productividad					
	RDI		MP		GMP	HM		
'Manuare'	1.16	abc	80	g	79.77	h	79.55	gh
'Tacarigua'	1.15	bcd	81.5	ef	81.31	fg	81.13	ef
'Tiziú'	1.16	abc	84	a	83.76	ab	83.52	ab
I-1997	1.18	ab	82.67	abcde	82.39	abcdef	82.12	bcdef
I-2011	1.12	cde	82.33	bcdef	82.2	bcdefg	82.07	bcdef
I-2019	1.13	cde	82.17	bcdef	82.01	cdefg	81.87	cdef
I-2041	1.1	e	83.17	abcd	83.08	abcde	82.99	abcd
I-2155	1.16	abc	81	fg	80.78	gh	80.55	fg
I-2216	1.12	cde	82.5	bcdef	82.38	abcdef	82.25	abcde
I-2218	1.15	bcd	81.5	ef	81.31	fg	81.13	ef
I-2363	1.12	cde	81.67	def	81.54	efg	81.4	def
I-2368	1.12	cde	82.33	bcdef	82.2	cdefg	82.07	bcdef
I-2494	1.2	a	83.5	ab	83.16	abcd	82.82	abcd
I-2581	1.14	bcde	81.83	cdef	81.66	defg	81.5	def
I-2583	1.12	cde	82.33	bcdef	82.2	bcdefg	82.07	bcdef
I-2592	0.97	g	73.67	i	73.65	j	73.63	j
Línea 13 (Gen 19)	1.12	cde	82.33	bcdef	82.2	bcdefg	82.07	bcdef
UCV-100	1.02	f	77.5	h	77.48	i	77.46	i
UCV-56	1.09	e	78.5	h	78.42	i	78.34	hi
UCV-88	1.1	de	83.33	abc	83.24	abc	83.14	abc
UCV-Línea 16	1.11	de	84	a	83.88	a	83.76	a

RDI: Índice relativo a la sequía, MP: Índice de la media aritmética, GMP: Índice de la media geométrica, HM: Índice de la media armónica. Medias con una letra común no son estadísticamente diferentes ($p=0.05$).

Variables Fisiológicas

Las variables Índice de cosecha a vaina (ICV) y Lectura SPAD fueron las variables fisiológicas que mostraron interacción Genotipo x Ambiente, y por ende, las utilizadas para aplicar los índices de sequía. En cuanto al ICV solamente existieron diferencias estadísticas significativas para el índice de productividad media armónica (HM), mientras que para la Lectura SPAD existieron diferencias estadísticas para todos los índices a excepción del índice de tolerancia RDI (Cuadro 39).

Cuadro 39. Análisis de la varianza para los índices de sequía aplicados a las variables fisiológicas Índice de Cosecha a vaina y Lectura SPAD.

Variables	FV	gl	Índice de Tolerancia	Índices de Productividad		
			RDI	MP	GMP	HM
Índice de Cosecha a Vaina	Bloque	2	0.07**	2.68 ns	4.13 ns	5.88 ns
	Genotipo	20	0.01 ns	11.57 ns	13.13 ns	14.94*
	Error	40	0.01	7.31	7.53	7.85
	Total	60				
	CV (%)		10.32	4.28	4.36	4.46
Lectura SPAD	FV	gl	RDI	MP	GMP	HM
	Bloque	2	0.0026 ns	59.24**	59.29**	59.29**
	Genotipo	20	0.01 ns	12.28**	11.88**	11.49**
	Error	40	0.0044	1.93	1.9	1.88
	Total	60				
CV (%)		5.96	3.37	3.35	3.34	

RDI: Índice relativo a la sequía, MP: Índice de la media aritmética, GMP: Índice de la media geométrica, HM: Índice de la media harmónica, * y ** indican diferencias estadísticas significativas para un $p < 0.05$ y $p < 0.01$, respectivamente.

El índice HM no logró discriminar de forma clara la capacidad productiva de los genotipos para la variable ICV. Aun así, los genotipos que presentaron una mayor movilización de foto-asimilados desde la cáscara hacia el grano fueron las variedades locales I-2581 e I-2363 con valores de 66.43% y 65.7%.

El genotipo I-2019 presentó la menor capacidad de movilización de asimilados con un 57.85% (Cuadro 40). Es importante mencionar el índice de tolerancia a la sequía RDI no mostró diferencias estadísticas entre los genotipos lo cual no indica necesariamente que todos los genotipos son susceptibles a la sequía para esta variable.

El índice RDI se basa en una proporción que expresa cuanto de lo obtenido en condiciones de sequía se obtuvo bajo condiciones de riego. De tal manera, que valores iguales o superiores a 1 indican tolerancia a la sequía mientras que valores menores a 1 indican susceptibilidad.

En este sentido todos los genotipos presentaron un valor superior a 0.8 para este índice a excepción de UCV-56 con un valor de 0.73. Estos son valores aceptables teniendo en cuenta que genotipos como Línea 13 e I-2581 presentaron los mayores valores de 0.99 y 0.98, respectivamente (Cuadro 40).

En otras palabras, los genotipos evaluados en este ensayo presentaron valores aceptables de tolerancia a la sequía. La gran mayoría mantuvo la capacidad de movilización de foto-asimilados hacia la formación de granos a pesar de la poca disponibilidad de humedad durante el período de floración.

En cuando a la variable Lectura SPAD no existieron diferencias estadísticas significativas para el índice de tolerancia RDI. En términos generales todos los genotipos presentaron valores mayores a 1 lo que indica que mejoraron su comportamiento al aumentar el grado de verdor bajo condiciones de sequía. Adicionalmente, los índices de productividad mostraron resultados muy similares entre ellos indicando que los genotipos con un mayor verdor fueron I-2041, I-2583, UCV-56, UCV-88 y UCV-Línea 16, independientemente del ambiente (Cuadro 41).

A pesar de que existe una tendencia clara en el aumento del verdor de las hojas bajo condición de sequía y en el comportamiento diferencial entre los genotipos al pasar de riego a sequía (Cuadro 21) el uso de un índice de tolerancia no permitió evidenciar esas diferencias. Por lo que, tal cual como exponen Rosales-Serna *et al* (2004) y Polania (2011), su uso como criterio de selección no es recomendable.

Cuadro 40. Prueba de medias de Duncan de índices de sequía para la variable Índice de Cosecha a Vaina

Genotipo	Índice de Tolerancia	Índices de Productividad			
	RDI	MP	GMP	HM	
‘Manuare’	0.85	62.51	62.26	62.02	abcd
‘Tacarigua’	0.9	64.05	63.96	63.87	abc
‘Tiziú’	0.93	64.26	64.13	64.01	abc
I-1997	0.81	60.75	60.33	59.91	bcd
I-2011	0.88	65.36	65.21	65.07	ab
I-2019	0.88	58.84	58.34	57.85	d
I-2041	0.91	61.74	61.64	61.54	abcd
I-2155	0.9	63.43	63.29	63.17	abcd
I-2216	0.86	65.39	65.2	65.02	ab
I-2218	0.82	64.74	64.28	63.84	abc
I-2363	0.97	65.72	65.71	65.7	a
I-2368	0.84	63.33	63.03	62.74	abcd
I-2494	0.84	60.45	60.14	59.83	bcd
I-2581	0.98	66.56	66.49	66.43	a
I-2583	0.91	64.57	64.4	64.24	abc
I-2592	0.97	63.88	63.8	63.71	abc
Línea 13 (Gen 19)	0.99	62.62	62.45	62.29	abcd
UCV-100	0.97	63.13	63.1	63.07	abcd
UCV-56	0.73	60.49	59.59	58.72	cd
UCV-88	0.85	63.1	62.85	62.59	abcd
UCV-Línea 16	0.87	62.6	62.35	62.11	abcd

RDI: Índice relativo a la sequía, MP: Índice de la media aritmética, GMP: Índice de la media geométrica, HM: Índice de la media harmónica. Medias con una letra común no son estadísticamente diferentes ($p=0.05$).

Cuadro 41. Prueba de medias de Duncan de índices se sequía para la variable Lectura SPAD.

Genotipo	Índice de Tolerancia	Índices de Productividad			
	RDI	MP	GMP	HM	
‘Manuare’	1.07	40.28 bcde	40.21 cde	40.15 cde	
‘Tacarigua’	1.09	41.25 abcd	41.2 abcd	41.15 abcd	
‘Tiziú’	1.2	42.16 abcd	41.97 abcd	41.78 abcd	
I-1997	1.1	39.82 de	39.76 de	39.7 de	
I-2011	1.09	35.88 f	35.84 f	35.8 f	
I-2019	1.14	41.32 abcd	41.23 abcd	41.14 abcd	
I-2041	1.19	43.47 a	43.31 a	43.15 a	
I-2155	1.02	39.97 cde	39.96 cde	39.94 cde	
I-2216	1.04	41.22 abcd	41.21 abcd	41.2 abcd	
I-2218	1.1	38.32 e	38.27 e	38.23 e	
I-2363	1.15	42.71 ab	42.61 abc	42.5 abc	
I-2368	1.08	41.14 abcd	41.07 abcd	41 abcd	
I-2494	1.11	42.62 abc	42.54 abc	42.46 abc	
I-2581	1.12	42.02 abcd	41.94 abcd	41.85 abcd	
I-2583	1.21	43.45 a	43.25 a	43.05 a	
I-2592	1.07	38.37 e	38.34 e	38.31 e	
Línea 13 (Gen 19)	1.08	40.47 bcde	40.43 bcde	40.38 bcde	
UCV-100	1.11	40.49 bcde	40.42 bcde	40.36 bcde	
UCV-56	1.14	43.19 a	43.08 ab	42.97 ab	
UCV-88	1.15	43.74 a	43.63 a	43.52 a	
UCV-Línea 16	1.14	43.54 a	43.44 a	43.35 a	

RDI: Índice relativo a la sequía, MP: Índice de la media aritmética, GMP: Índice de la media geométrica, HM: Índice de la media armónica. Medias con una letra común no son estadísticamente diferentes ($p=0.05$).

B. EVALUACIÓN EN INVERNADERO

En el ensayo realizado en invernadero, el riego fue aplicado por última vez para todos los genotipos a los 28 dds, momento a partir del cual fue inducida la sequía. A partir de entonces, se realizaron evaluaciones de tipo morfológica y fisiológica a los 0, 7 y 14 días del estrés. Finalmente, a los 14 días después de la aplicación del déficit hídrico, una vez realizadas todas las mediciones, se determinó la biomasa total producida por genotipo la cual fue separada en biomasa viva y biomasa muerta a fin de determinar el % de biomasa viva por genotipo.

I. Variables morfológicas

Área foliar (AF) y Área foliar específica (AFE)

En el Cuadro 42 se muestran los estadísticos descriptivos para las variables morfológicas Área foliar (AF) y Área foliar específica (AFE) medidas a los 0, 7 y 14 días después de la suspensión del riego. Para la variable AF se observa una disminución promedio a medida que la intensidad del estrés aumenta al pasar de 82.82 cm² a 66.01 cm². Esta reducción en el área foliar debido a la sequía es ampliamente conocida en esta especie y mencionada por diversos autores (Moyeja, 1997; Farooq *et al.*, 2009; Reyes-Matamoros *et al.*, 2014). Por ejemplo, Reyes-Matamoros *et al.* (2014) reportaron una disminución del 40% del AF al evaluar un genotipo de caraota en condiciones de riego óptimo y en condiciones de sequía al pasar de 63.76 cm² a 38.62 cm².

El crecimiento celular es uno de los procesos fisiológicos más sensibles a la sequía debido a la reducción en la presión de turgor. Bajo un déficit hídrico severo, la elongación celular puede ser inhibida por la interrupción en el flujo de agua desde el xilema hacia los alrededores de las células elongadas, lo cual ocasiona una reducción en el área foliar (Farooq *et al.*, 2009).

Estos mismos autores indican que los genotipos tolerantes a la sequía son aquellos que tienen la capacidad de mantener el área foliar y el crecimiento bajo condiciones de

déficit hídrico durante el desarrollo vegetativo. Dicha respuesta puede ser un reflejo de la presencia de un desarrollo radical profundo que permite a la planta mantener un potencial hídrico positivo así como de mecanismos fisiológicos que le permiten hacer un uso eficiente del agua disponible (Farooq *et al.*, 2009).

Cuadro 42. Estadísticos descriptivos de las variables morfológicas evaluadas en invernadero a los 0, 7 y 14 días del déficit hídrico.

Variable	Media	Mín.	Máx.	Asimetría	Kurtosis	Normalidad
AF 0 días	82.82 ± 18.88	34.03	119.1	-0.55	0.01	0.96
AF 7 días	77.83 ± 16.81	36.65	114.93	-0.37	-0.18	0.97
AF 14 días	66.01 ± 19.25	28.84	115.64	0.04	-0.37	0.97
AFE 0 días	0.40 ± 0.06	0.27	0.55	0.54	-0.26	0.95
AFE 7 días	0.50 ± 0.07	0.25	0.7	-0.87	4.22	0.92
AFE 14 días	0.48 ± 0.12	0.24	0.8	-0.04	-0.1	0.98

AF: Área foliar (cm²); AFE: Área foliar específica (cm².mg⁻¹).

Los resultados obtenidos reflejan una respuesta diferencial entre los genotipos a medida que aumenta el estrés por sequía (Figura 6). Para la gran mayoría de los genotipos el AF tiende a disminuir desde el momento de la aplicación del déficit hídrico (0-7 días) hasta el momento en el cual el déficit es más severo (7-14 días). Estos genotipos son I-2155, I-2368, I-2011, I-2216, I-2581, UCV-88, I-2218, I-2583, TIZIÚ, UCV-Línea 16, I-2363, I-2019, I-2592 y UCV-100. Dentro de este grupo, los más afectados fueron los cultivares locales I-2011, I-2592 e I-2363.

Por otro lado, los genotipos I-2041 e I-1997 comenzaron a disminuir el AF después de los 7 días de la suspensión del riego. Así mismo, los genotipos UCV-56 y ‘Tacarigua’ lograron mantener el AF durante el periodo de sequía. Finalmente, la variedad comercial ‘Manuare’ presentó un comportamiento distinto al resto de los genotipos evaluados al aumentar el área foliar durante 14 días del periodo de sequía (Figura 6).

De acuerdo a lo citado anteriormente por Farooq *et al.* (2009), el genotipo 'Manuare' estaría demostrando cierta tolerancia a la sequía. Si el AF es un estimador del grado de turgencia de la célula, la respuesta de este genotipo muestra que el mismo logra mantener un alto potencial hídrico en las hojas a pesar del estrés (Farooq *et al.*, 2009; Mayor, 2010).

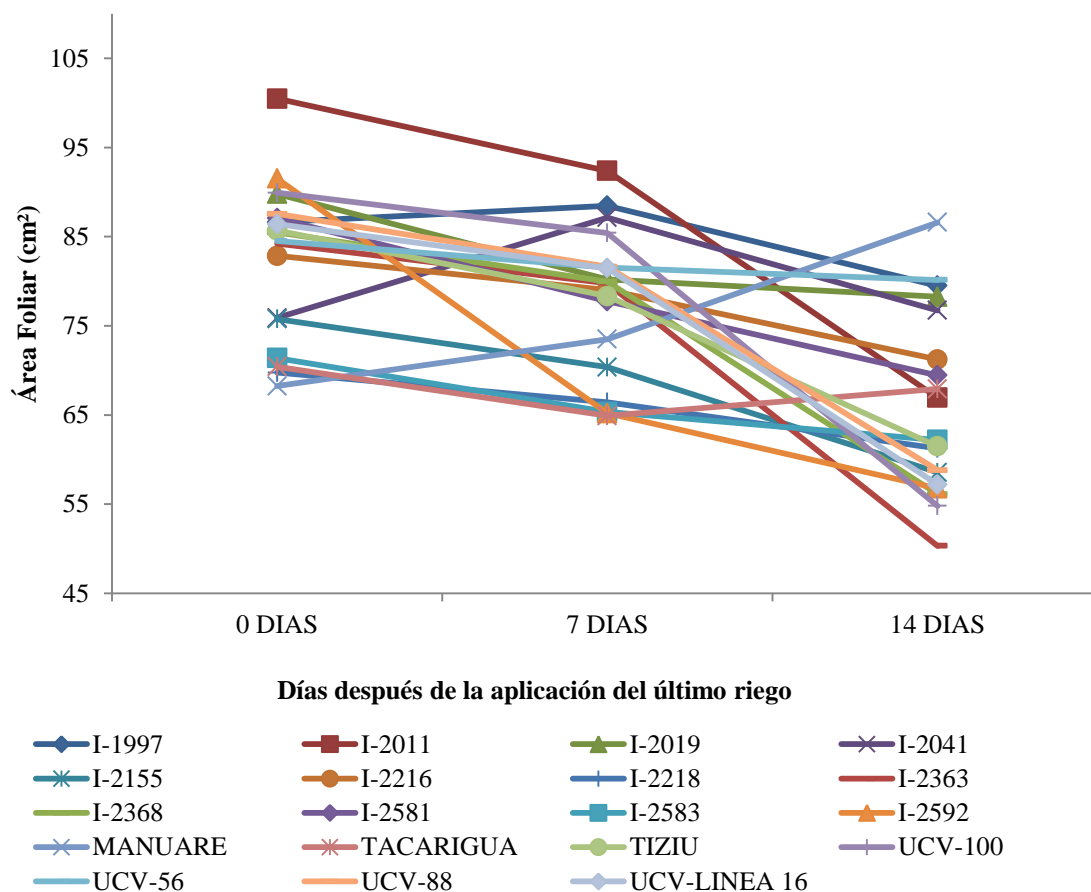


Figura 6. Área foliar (AF) de 19 genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) evaluados a los 0, 7 y 14 días del período del déficit hídrico bajo condiciones de invernadero.

El índice de área foliar específica, es definida como la razón entre el área de la hoja y su peso y es inversamente proporcional al grosor de la hoja. Es uno de los componentes del área foliar asociados a la tolerancia a la sequía (Cardona-Ayala *et al.*, 2013). En términos generales se observó un aumento en el AFE durante la primera

etapa del estrés (0-7 días) al pasar de $0.40 \text{ cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ a $0.50 \text{ cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$. Sin embargo, ésta se mantuvo hasta el final del ensayo con un valor promedio de $0.48 \text{ cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ (Cuadro 42).

Los resultados para la variable AFE indican una respuesta diferencial entre los genotipos a medida que se intensifican las condiciones de estrés. Por un lado, un grupo de genotipos tiende mantener los valores de AFE a medida que aumenta la sequía, mientras que otros aumentan. Adicionalmente, se observó que un pequeño grupo de genotipos disminuyeron el grosor de sus hojas a causa del estrés (Figura 7).

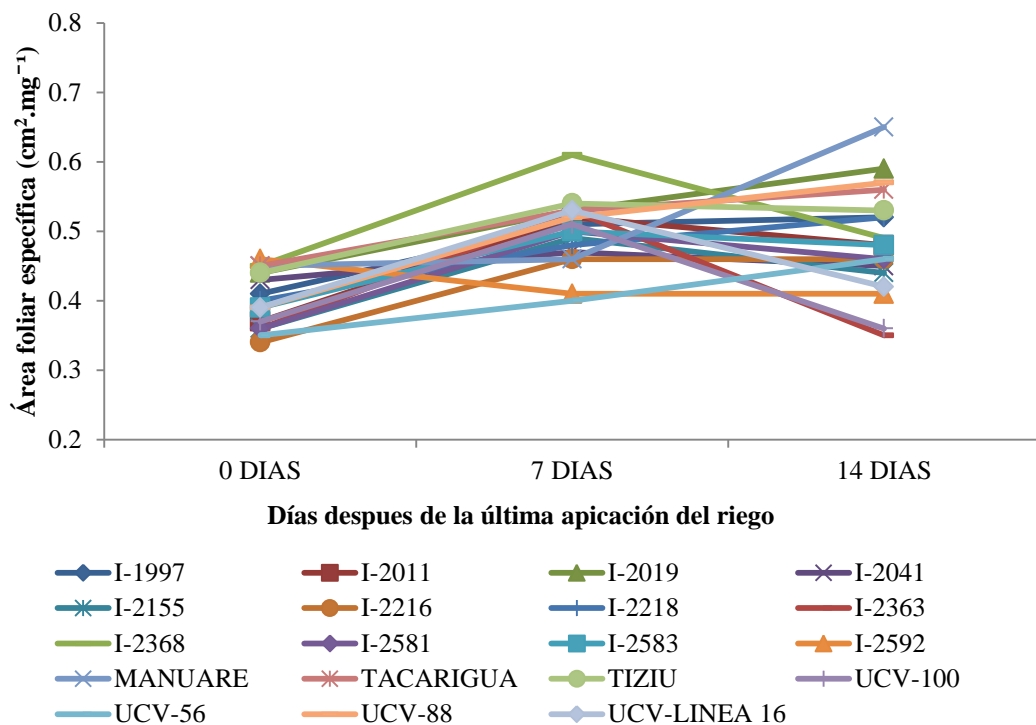


Figura 7. Área foliar específica (AFE) de 19 genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) evaluados a los 0, 7 y 14 días del período del déficit hídrico bajo condiciones de invernadero.

Los genotipos que aumentaron el AFE fueron I-2363, UCV-100, I-2041, UCV-Línea 16, I-2581, I-2155, I-2011, I-2583 e I-2368. Dentro de este grupo las variedades I-2363 y UCV-100 presentaron un aumento significativo de más del 50% en el grosor

de las hojas. Es interesante destacar que ambos genotipos presentaron la mayor reducción del área foliar, lo cual sugiere la presencia de un mecanismo de compensación ante el estrés (Figura 7).

Lo contrario fue observado para el genotipo 'Manuare', quien presentó una disminución significativa en el grosor de la hoja. Sin embargo, dicho genotipo presentó un aumento sustancial en el área foliar. Otro genotipo a resaltar es UCV-56, quien al igual que 'Manuare' presentó una disminución en el AFE a pesar de mantener el AF a medida que aumenta el estrés por sequía.

El área foliar específica es un indicador del grosor de la hoja, y según señala Mayor (2010) es un mecanismo de compensación que los genotipos pueden expresar ante la reducción del área foliar causada por la sequía. Sin embargo, de acuerdo a lo reportado por Ascencio (1972) valores cercanos a $0.4 \text{ cm}^2.\text{gr}^{-1}$ son normales en esta especie, los cuales aumentan y disminuyen ligeramente a lo largo de su desarrollo fenológico.

II. Variables Fisiológicas

Las variables fisiológicas evaluadas en invernadero fueron Lectura SPAD y temperatura foliar (SPAD), Biomasa total por planta (gr) y Biomasa viva (%). Las primeras dos variables fueron evaluadas a los 0, 7 y 14 días después de la aplicación del último riego, mientras que las dos últimas fueron determinadas al momento de la cosecha de la biomasa a los 42dds.

Lectura SPAD

La variable Lectura SPAD presentó valores promedios de 35.36, 28.75 y 16.16 a los 0, 7 y 14 días de la suspensión del riego, respectivamente (Cuadro 43). Esta disminución es un indicativo de pérdida del verdor en las hojas y es un reflejo del efecto de la sequía sobre los genotipos evaluados. Sin embargo, los valores máximos observados para esta variable muestran la presencia de genotipos que lograron mantener su verdor a pesar del estrés.

La figura 8 muestra el comportamiento de cada genotipo durante la aplicación del déficit hídrico severo. En la misma se observa que todos los genotipos disminuyeron el grado verdor. Aun así, existen diferencias en el grado o magnitud de la disminución.

Cuadro 43. Estadísticos descriptivos para las variables fisiológicas evaluadas en invernadero a los 0, 7 y 14 días del déficit hídrico.

Variable	Media	Mín.	Máx.	Asimetría	Kurtosis	Normalidad
SPAD 0 días	35.36 ± 3.20	28.8	42.8	-0.27	-0.51	0.96
SPAD 7 días	28.75 ± 4.18	21.8	40.8	0.62	0.07	0.95
SPAD 14 días	16.16 ± 8.06	1.7	39.5	0.54	0.22	0.96
Temp. Foliar 0 días	30.09 ± 0.79	28.3	31.4	-0.41	-0.24	0.93
Temp. Foliar 7 días	37.76 ± 2.50	31.4	42.1	-0.23	-0.27	0.94
Temp. Foliar 14 días	36.36 ± 1.81	33.1	19.8	0.16	-0.72	0.92

Por ejemplo, los genotipos UCV-56 e I-2041 no solo presentaron los mayores valores de unidades SPAD, sino que también fueron los que más lograron mantener el verdor en sus hojas. Un comportamiento similar fue observado para los genotipos UCV-Línea 16, UCV-88 y 'Tiziú', aunque con valores de unidades SPAD menores.

Para el resto de los genotipos el valor de unidades SPAD disminuyó drásticamente al final del estrés por sequía, siendo el genotipo I-2368 el más afectado. La figura 9 muestra una comparación del grado de verdor reflejado por la Lectura SPAD entre dos genotipos con respuestas contrastantes.

Aunque ciertos autores señalan que la relación entre el grado de verdor y la tolerancia a la sequía es incierta, la respuesta diferencial observada entre los genotipos en este ensayo indica la presencia de algún mecanismo de tolerancia a la sequía, específicamente en los genotipos UCV-56, I-2041, UCV-Línea 16 y UCV-88 quienes lograron mantener su grado de verdor a pesar de la sequía inducida por 14 días.

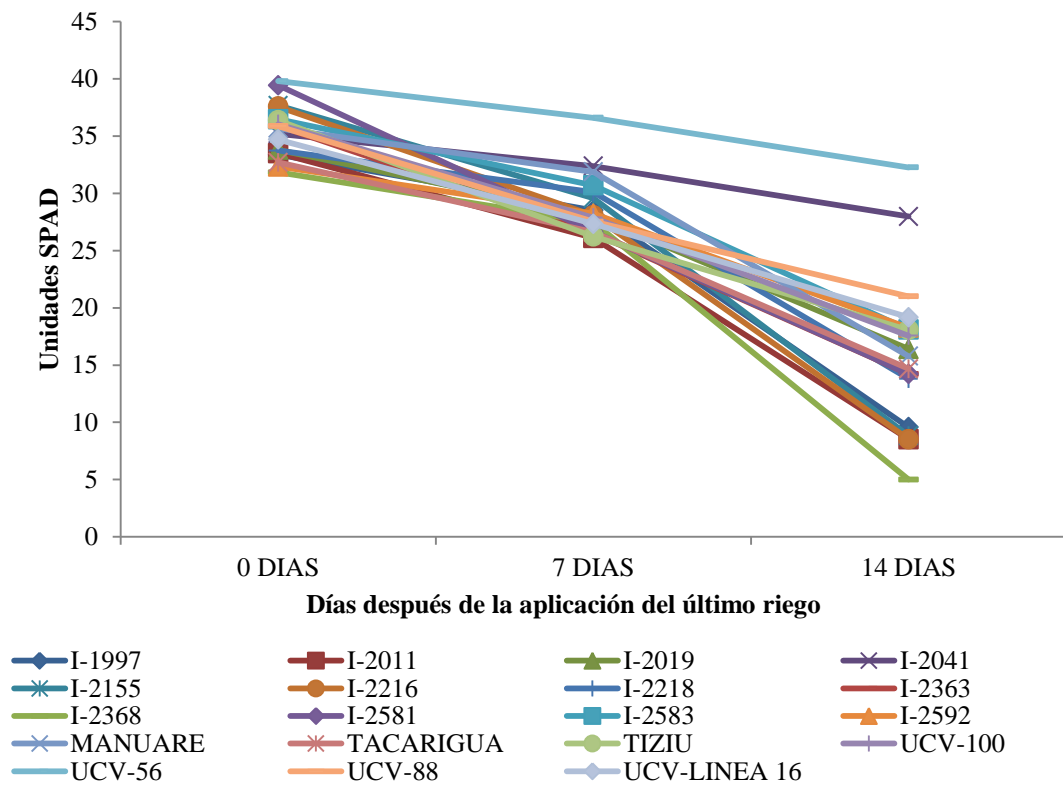


Figura 8. Unidades de valores SPAD para los 19 genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) evaluados en invernadero a los 0, 7 y 14 días después de la aplicación del último riego.

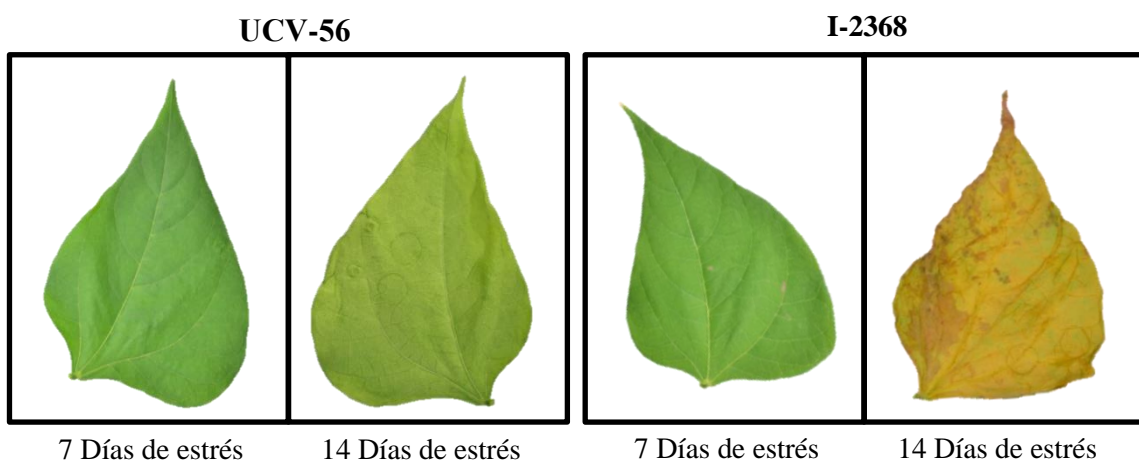


Figura 9. Foliolos de los genotipos UCV-56 e I-2368 a los 7 y 14 días de la aplicación del último riego.

Temperatura foliar

En cuanto a la temperatura foliar se observó un promedio de 30.09°C, 37.76°C y 36.36°C a los 0, 7 y 14 días de estrés, respectivamente (Cuadro 44). Este aumento sustancial en la primera etapa del estrés (0-7 días) es una muestra del efecto de la aplicación del tratamiento de déficit hídrico en el ensayo.

Todos los genotipos mostraron un comportamiento similar a medida que las condiciones de sequía se intensificaban (Figura 10). Aunque todos presentaron un aumento en la temperatura del follaje, no todos los genotipos lo hicieron al mismo grado.

Los genotipos I-2155 y UCV-88 presentaron un comportamiento diferencial en cuanto a la magnitud en el aumento de la temperatura. El cultivar local presentó la menor temperatura con 34.4°C mientras que UCV-88 presentó la mayor temperatura con 39.8°C a los 14 días después de la aplicación del último riego.

Una temperatura del follaje relativamente baja en condiciones de déficit hídrico, podría indicar una mejor capacidad de tomar agua y mantener un estado hídrico favorable (Polania, 2011). Así mismo, temperaturas bajas en el dosel de la planta puede ser un indicio de la presencia de una mayor cantidad de ceras epicuticulares y/o tricomas lo cual permite que haya una mayor reflectancia, disminuyendo la energía absorbida por la hoja reduciendo no solo la temperatura sino también la pérdida de agua (Mayor, 2010).

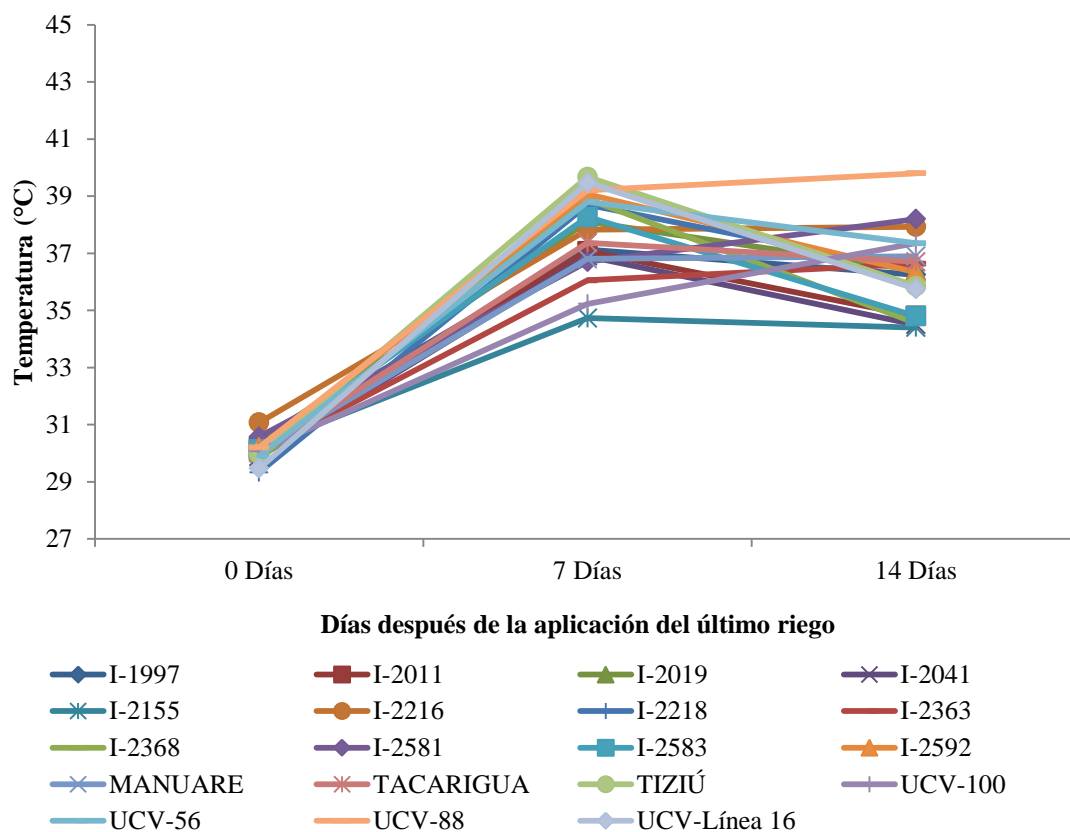


Figura 10. Temperatura foliar de 19 genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) evaluadas en invernadero a los 0, 7 y 14 días después de la aplicación del último riego bajo condiciones de invernadero.

Biomasa total por planta y % de Biomasa viva

El Cuadro 44 presenta los estadísticos descriptivos para las variables Biomasa total por planta (gr) y % de Biomasa viva. La producción de biomasa seca promedio por planta fue de 6.29 gr con valores mínimos y máximos de 2.65 gr y 9.78 gr, respectivamente. Así mismo, en cuanto al % de Biomasa viva, se obtuvo un promedio de 70.08% a los 14 días del estrés por déficit hídrico (Cuadro 44).

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza para estas variables, existieron diferencias estadísticamente significativas entre los genotipos tanto para la producción

de Biomasa total por planta ($p<0.05$) así como para el % de Biomasa viva ($p<0.01$) (Cuadro 45).

La variable % de Biomasa viva es interpretada en este trabajo como una medida de rendimiento y por ende es la variable que permitió identificar a genotipos tolerantes a la condición de sequía simulada en este ensayo. El genotipo que presentó un mayor % de biomasa viva fue el cultivar local I-2041 con 91.57%, seguido del genotipo UCV-56 con 86.92% y el cultivar I-2019 con 80.73%. El resto de los genotipos presentaron valores por debajo del 75% evidenciando una mayor sensibilidad ante la condición de sequía (Cuadro 46 y Figura 11).

Cuadro 44. Estadísticos descriptivos para las variables fisiológicas evaluadas a los 14 días del déficit hídrico en caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones de invernadero.

Variable	Media	Mín.	Máx.	Asimetría	Kurtosis	Normalidad
Biomasa total por planta (gr)	6.29 ± 1.67	2.65	9.78	0.09	-0.59	0.97
Biomasa viva (%)	70.08 ± 11.45	50.08	95	0.23	-0.72	0.95

Cuadro 45. Análisis de la varianza para las variables fisiológicas evaluadas a los 14 días del déficit hídrico.

F.V.	gl	Biomasa total (gr)	Biomasa viva (%)
Bloque	2	0.64 ns	16.32 ns
Genotipo	18	4.65*	273.82**
Error	36	2.00	66.14
Total	56		
CV(%)		22.49	11.6

ns: no significativo estadísticamente; * y ** indican diferencias estadísticas significativas para $p<0.05$ y $p<0.01$, respectivamente.

Cuadro 46. Prueba de medias de Duncan para las variables Biomasa total (gr) y Biomasa viva (%) de 19 genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) evaluados en invernadero a los 14 días después de la aplicación del último riego.

Genotipo	Biomasa total (gr)		Biomasa viva (%)	
I-1997	6.31	abc	70.81	cdefg
I-2011	6.97	abc	55.3	g
I-2019	8.08	a	80.73	abc
I-2041	5.59	abcd	91.57	a
I-2155	7.49	ab	59.57	efg
I-2216	7.46	ab	71.12	cdefg
I-2218	7.45	ab	74.68	bcde
I-2363	5.8	abcd	57.75	fg
I-2368	5.8	abcd	71.07	cdefg
I-2581	7.01	abc	68.86	cdefg
I-2583	5.63	abcd	70.24	cdefg
I-2592	7.38	ab	61.42	efg
MANUARE	6.44	abc	63.25	defg
TACARIGUA	4.24	cd	62.75	defg
TIZIU	5.27	abcd	70.44	cdefg
UCV-100	5.16	bcd	64.12	defg
UCV-56	7.7	ab	86.92	ab
UCV-88	3.38	d	73.46	bcdef
UCV-LINEA 16	6.39	abc	77.53	abcd

Medias con una letra común indican que no son estadísticamente diferentes ($p=0.05$)

Es interesante destacar que los resultados obtenidos en la evaluación bajo condiciones de invernadero presentaron cierta relación con los resultados de producción por planta obtenidos en la evaluación realizada en condiciones de campo, específicamente con el % de reducción en el rendimiento debido a la sequía.

Aunque los genotipos que presentaron mayor % de Biomasa viva en invernadero no necesariamente mostraron los menores valores de reducción del rendimiento en condiciones de campo, aquellos que presentaron un menor % de Biomasa viva en invernadero si presentaron los mayores valores de reducción del rendimiento en campo.

Por ejemplo, los genotipos I-2011, I-2592, I-2155, 'Tacarigua' y 'Manuare' fueron los más afectados por la aplicación del déficit hídrico severo en invernadero, presentando los menores valores de % de Biomasa viva. Sin embargo, estos mismos genotipos son los que tuvieron un mayor % de reducción del rendimiento en campo con un 72%, 66.8%, 73%, 76.5% y 65%, respectivamente (Cuadro 26). De tal manera que la evaluación realizada en invernadero permitió identificar a los genotipos que realmente fueron susceptibles a la sequía.

En otras palabras, los resultados obtenidos bajo condiciones de invernadero, producto de esta investigación, evidencian la posibilidad de realizar evaluaciones preliminares que permitan hacer al menos una selección negativa al descartar genotipos realmente susceptibles a la sequía. Esta evaluación preliminar o *screening* es una estrategia que permite evaluar una gran cantidad de genotipos con la finalidad de descartar o seleccionar individuos promisorios a través de variables que sean rápidas, fáciles y económicas de medir.

Una vez realizada la evaluación preliminar, los genotipos pre-seleccionados podrán ser objeto de evaluaciones más complejas, para lo cual es necesaria la inversión de mayores recursos, tiempo y trabajo. El objetivo de estas metodologías está relacionado con hacer un uso eficiente de los recursos, al evaluar a genotipos que posean características deseables de acuerdo a los objetivos de un programa de mejoramiento genético.

Las evaluaciones preliminares realizadas en condiciones de invernadero presentan una gran ventaja ante el reto de identificar genotipos promisorios tolerantes al déficit hídrico.

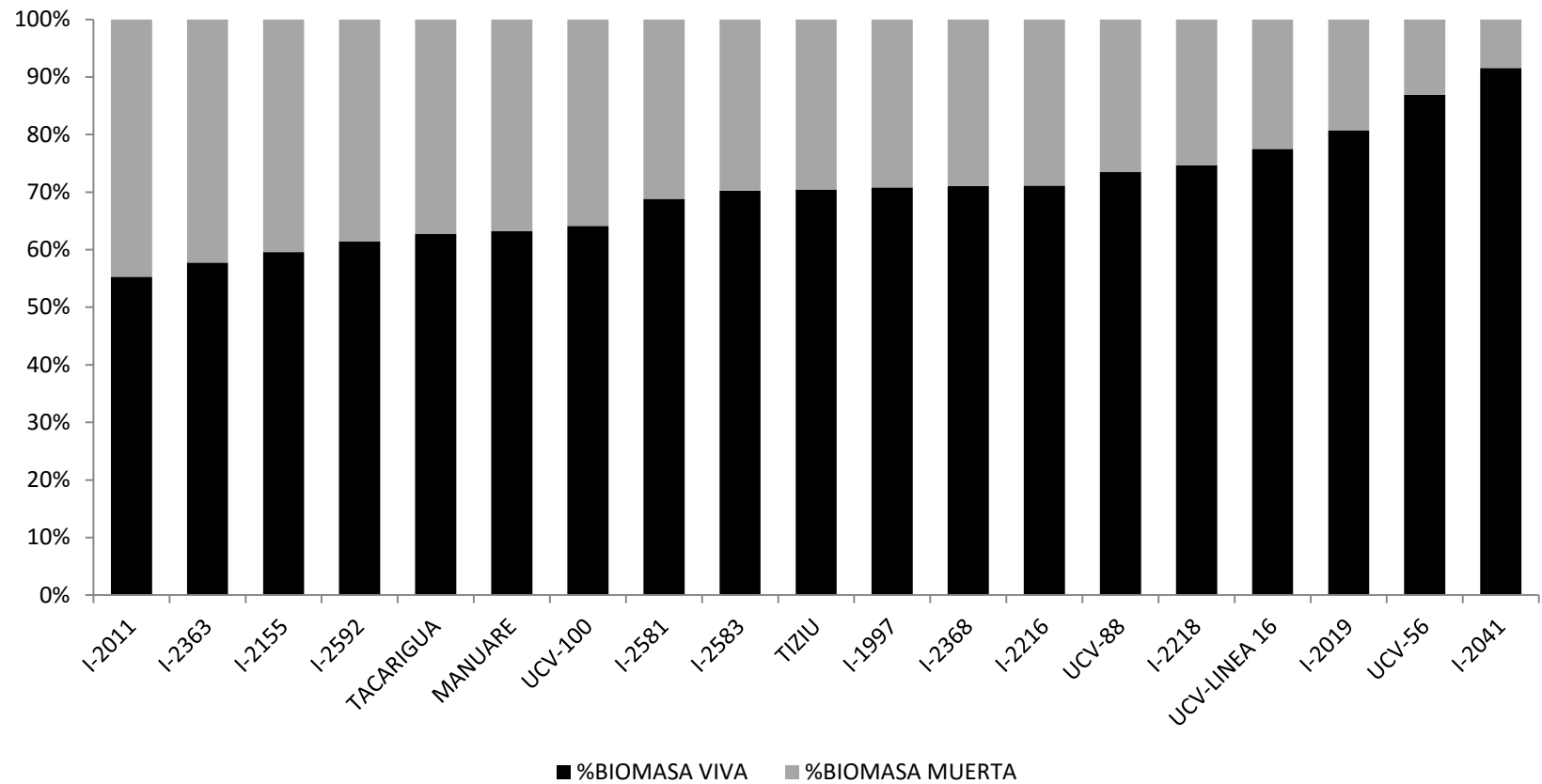


Figura 11. Proporción de Biomasa viva (%) y Biomasa muerta (%) de 19 genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) evaluados en invernadero a los 14 días después de la aplicación del último riego.

C. ANÁLISIS DISCRIMINANTE DE LAS VARIABLES ASOCIADAS CON LA TOLERANCIA AL DÉFICIT HÍDRICO

Selección de Variables

Como se ha comentado anteriormente, la tolerancia a la sequía es un carácter muy elusivo desde un punto de vista genético, dificultando la identificación de genotipos superiores (Ceccarelli *et al*, 2009). Es por ello que, para aumentar la eficiencia en los programas de mejoramiento genético, es importante establecer diseños de evaluación apropiados así como aplicar criterios de selección eficientes que permitan identificar genotipos tolerantes a la sequía (Polania, 2011; Araus *et al.*, 2002).

Con relación al establecimiento de un diseño de evaluación apropiado, es importante destacar la diferencia entre la tolerancia a la sequía y la alta productividad bajo condiciones de estrés. Para la identificación de genotipos tolerantes a la sequía, ideales como progenitores para el desarrollo de poblaciones básicas, es necesario la evaluación conjunta y simultánea de los genotipos tanto en condiciones óptimas de riego como en condiciones naturales o simuladas de sequía.

Este diseño de evaluación permite comparar la *capacidad propia* de un genotipo de mantener su productividad al enfrentarse al déficit hídrico, evidenciando la expresión de mecanismos de tolerancia. A su vez, es posible identificar genotipos con una mayor productividad en condiciones de sequía los cuales pueden ser recomendados como cultivares.

Por otro lado, para que una variable pueda convertirse en un criterio de selección eficiente debe cumplir con ciertos requisitos. De acuerdo con distintos autores, un buen criterio de selección para la tolerancia a la sequía es aquella variable que estando correlacionada con el rendimiento en condiciones de estrés no está correlacionada con bajos rendimientos en ambientes favorables. Así mismo, debe presentar un mayor grado de determinación genético o heredabilidad que el rendimiento *per sé* y debe ser una variable reproducible, fácil, económica y rápida de medir (Acquah, 2007, Polania, 2011).

Después de analizar el comportamiento en condiciones de campo e invernadero se precisa definir aquellas variables que puedan ser recomendadas como criterio de selección en los programas de mejoramiento genético para la tolerancia al déficit hídrico en caraota, así como genotipos que puedan recomendarse como cultivares y/o progenitores

A tal fin, se realizó un análisis de correlación simple de las variables morfo-fisiológicas, fenológicas y agronómicas evaluadas con el rendimiento en condiciones de riego y de sequía para el ensayo de campo. Lo mismo fue realizado para el ensayo de invernadero considerando la biomasa viva como un estimador del rendimiento.

Adicionalmente, se realizó un análisis multivariado, específicamente, un análisis de componentes principales (ACP) el cual permitió identificar aquellas variables que mejor explican la variabilidad observada entre los genotipos bajo condiciones de riego y sequía.

VARIABLES EVALUADAS EN CAMPO

De todas las variables evaluadas en campo solamente el número de vainas por planta, altura de planta, plantas erectas (%) y lectura SPAD mostraron una correlación significativa con el rendimiento en condiciones de sequía. A su vez, estas variables no mostraron correlación negativa con el rendimiento en condiciones de riego (Cuadro 44).

En condiciones de sequía, el número de Vainas por planta mostró una correlación positiva y altamente significativa con el rendimiento ($r=0.85$, $p<0.01$). Como se ha comentado anteriormente, este componente de rendimiento ha sido reportado como el de mayor peso en la productividad de un genotipo. Por otro lado, el número de semillas por vaina y el peso de 100 semillas presentaron una muy baja correlación con el rendimiento y la misma no fue significativa ($r=0.1$ y $r=-0.13$, respectivamente)

La variable altura de planta presentó una correlación significativa pero baja ($r=-0.35$, $p<0.05$) con el rendimiento en sequía. En este caso la correlación fue negativa,

indicando que plantas que tienden a ser más bajas suelen tener un mayor rendimiento. Igualmente existió una correlación significativa pero baja ($r=0.34$, $p<0.05$) con el % de plantas erectas (Cuadro 47).

Cuadro 47. Coeficientes de correlación (r) entre las variables morfo-fisiológicas evaluadas en campo y el rendimiento en condiciones de riego y sequía.

Variables	Rendimiento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	
	Riego	Sequía
Vainas por planta	0.69**	0.85**
Semillas por vaina	0.42**	0.1
Peso de 100 semillas	0.22	-0.13
Índice de Cosecha	0.59**	0.1
Índice de Cosecha a Vaina	0.52**	0.03
Altura de planta (cm)	0.26	-0.35*
Vigor	0.24	-0.18
Plantas erectas (%)	0.01	0.34*
Lectura SPAD	-0.19	0.43**
Días a floración	0.24	-0.1
Días a mitad de llenado de grano	0.32*	0.1
Días a madurez fisiológica	0.57**	0.02
Grado de desarrollo	-0.15	-0.16
Días de llenado de grano	0.18	0.09

Valores de r con * y ** indican significancia estadística para $p<0.05$ y $p<0.01$, respectivamente.

Después del número de Vainas por planta, la variable que representó una mayor correlación con el rendimiento en sequía fue la Lectura SPAD, la cual mide el grado de verdor de las plantas. La correlación fue altamente significativa ($p<0.01$) con un $r=0.43$, indicando que a mayor grado de verdor mayor rendimiento bajo condiciones de sequía. Estos resultados contradicen lo reportado por Polania (2011) y Rosales-

Serna *et al.* (2004) quienes indican que el valor SPAD no está correlacionado con el rendimiento.

Adicionalmente, otros autores señalan que variables fenológicas como los días a floración y días a madurez fisiológica están altamente correlacionados con el rendimiento bajo condiciones de sequía de tipo terminal (Polania, 2011; Rosales-Serna *et al.*, 2004; Rao, 2009). Sin embargo, las diferencias encontradas en este trabajo pueden deberse a la metodología llevada a cabo para simular la sequía.

El análisis de componentes principales también permitió identificar variables adicionales útiles como criterios de selección. Tal como se aprecia en el Cuadro 48, el análisis que considera los datos de riego y sequía en conjunto, logra explicar hasta un 84,15% de la variabilidad observada con los primeros dos componentes y un 90,4% con los tres primeros. El análisis de los vectores (Cuadro 49) permitió identificar las variables con mayor peso para los primeros tres componentes, estos son plantas erectas (%), Índice de cosecha, Días a mitad de llenado de grano, número de vainas por planta y peso de 100 semillas.

Cuadro 48. Valores propios, varianza absoluta y acumulada explicada por los componentes principales 1 a 10 considerando características fenológicas y agronómicas de 21 genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) evaluados en dos condiciones de manejo hídrico: riego y sequía.

Componente principal (CP)	Riego			Sequía			Conjunto		
	Valor propio	% de la varianza explicado	% de la varianza acumulado	Valor propio	% de la varianza explicado	% de la varianza acumulado	Valor propio	% de la varianza explicado	% de la varianza acumulado
1	766.29	69.79	69.79	517.82	62.46	69.79	541.90	65.60	65.60
2	141.22	12.86	82.65	123.61	14.91	84.70	153.23	18.55	84.15
3	75.56	6.88	89.53	76.26	9.20	93.90	51.63	6.25	90.40
4	38.75	3.53	93.06	55.16	6.65	100.55	34.31	4.15	94.55
5	24.62	2.24	95.30	16.23	1.96	102.51	14.51	1.76	96.31
6	18.70	1.70	97.00	13.36	1.61	104.12	11.43	1.38	97.70
7	14.03	1.28	98.28	9.95	1.20	105.32	7.44	0.90	98.60
8	7.41	0.68	98.96	7.72	0.93	106.25	5.10	0.62	99.21
9	4.59	0.42	99.37	4.69	0.57	106.81	2.76	0.33	99.55
10	3.17	0.29	99.66	1.87	0.23	107.04	1.68	0.20	99.75
11	2.59	0.24	99.90	1.53	0.18	107.22	1.42	0.17	99.92

Cuadro 49. Importancia relativa para los componentes principales 1 a 5 de las características fenológicas y agronómicas evaluadas en 21 genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo dos condición de suplencia hídrica contrastante, riego y sequía.

Variable	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Vainas/Planta	0.15	-0.15	-0.64	0.57	0.11
Semillas/Vaina	-0.02	0.08	-0.05	-0.04	-0.03
P100S	-0.01	0.10	0.42	0.08	-0.18
Producción/Planta	0.02	0.24	-0.31	0.11	-0.19
Índice de Cosecha	-0.05	0.43	-0.32	-0.34	0.32
Índice de Cosecha a Vaina	-0.04	0.28	-0.23	-0.42	0.27
Altura de Planta	-0.16	0.00	0.10	-0.13	0.21
Vigor	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.01
Plantas Erectas	0.97	0.13	0.12	-0.09	0.05
SPAD	0.03	-0.21	-0.04	0.10	0.23
Días a Floración	0.02	-0.02	-0.16	-0.19	-0.50
Días a mitad de llenado	0.07	-0.50	-0.30	-0.47	-0.21
Días a Maduración	0.05	-0.41	-0.03	-0.23	0.03
Grado de Desarrollo	-0.02	0.04	0.07	0.13	0.25
Días a Llenado	0.03	-0.39	0.13	-0.04	0.53

Al discernir la contribución relativa de cada característica en los primeros cinco componentes principales (Cuadros 48 y 49), se observa que tanto para la condición de riego como de sequía se logran diferenciar los genotipos con base en la proporción de plantas erectas (%) y altura de planta (cm). Tal como se observa en el análisis biplot (Figura 12), los genotipos bajo condición de riego se agrupan por poseer una menor proporción de plantas erectas y una mayor altura de plantas. Lo contrario ocurre bajo la condiciones de sequía, como fue demostrado en el análisis de correlación simple (Cuadro 44).

El genotipo I-2592 tiene un comportamiento distinto pues tanto la variable altura de planta como proporción de plantas erectas no se ven afectadas por la condición hídrica. Este genotipo, de semillas grandes y rojizas, es el más precoz, por lo que logra su desarrollo fenológico en menor tiempo antes de ser afectado por el periodo de sequía aplicado.

Cuadro 50. Importancia relativa para los componentes principales 1 a 5 de las características fenológicas y agronómicas evaluadas en 21 genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo condición de riego.

Variable	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Vainas/Planta	0,090	-0,418	-0,607	0,550	0,030
Semillas/Vaina	-0,013	0,070	-0,036	-0,059	-0,030
P100S	-0,002	0,143	0,186	0,145	0,534
Producción/Planta	0,003	0,104	-0,399	0,101	0,235
Índice de Cosecha	-0,045	0,356	-0,526	-0,272	0,071
Índice de Cosecha a Vaina	-0,033	0,197	-0,348	-0,364	0,085
Altura de Planta	-0,177	-0,001	-0,030	-0,215	0,571
Vigor	-0,001	0,011	-0,018	-0,019	0,037
Plantas Erectas	0,975	0,121	0,020	-0,072	0,101
SPAD	0,016	-0,250	-0,004	0,094	0,005
Días a Floración	0,013	-0,030	-0,084	-0,174	-0,249
Días a mitad de llenado	0,053	-0,509	-0,126	-0,537	-0,145
Días a Maduración	0,039	-0,391	0,028	-0,240	0,180
Grado de Desarrollo	-0,018	0,054	0,016	0,122	0,098
Días de Llenado	0,027	-0,362	0,112	-0,066	0,429

En condición de sequía, además de la variable proporción de plantas erectas, el número de vainas por planta permitió discriminar entre los comportamientos de los genotipos. Para la condición de riego, no se observan esas diferencias por lo que esta variable no posee una importancia relativa significativa.

Al revisar el componente principal 2, se identifica a la variable Número de vainas por planta con un mayor peso en ambas condiciones, por lo que esta variable permite evidenciar las diferencias entre genotipos. Igualmente, para la variable Días a mitad de llenado, aunque en condición de sequía posee una menor importancia relativa.

Cuadro 51. Importancia relativa para los componentes principales 1 a 5 de las características fenológicas y agronómicas evaluadas en 21 genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo condición de sequía.

Variable	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Vainas/Planta	-0,24	-0,82	-0,19	0,30	-0,04
Semillas/Vaina	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,03
P100S	0,03	0,26	-0,11	0,23	0,62
Producción/Planta	-0,08	-0,25	-0,09	0,12	0,35
Índice de Cosecha	0,00	-0,02	-0,68	-0,39	-0,09
Índice de Cosecha a Vaina	0,00	0,00	-0,45	-0,44	0,11
Altura de Planta	0,19	0,06	-0,11	0,02	0,35
Vigor	0,00	0,01	-0,01	0,01	0,00
Plantas Erectas	-0,95	0,25	0,04	-0,09	0,07
SPAD	-0,01	-0,18	0,05	-0,03	0,43
Días a Floración	0,00	-0,04	0,09	-0,09	-0,21
Días a mitad de llenado	0,00	-0,26	0,38	-0,51	0,11
Días a Maduración	0,02	-0,15	0,27	-0,37	0,09
Grado de Desarrollo	0,02	0,03	-0,08	0,08	0,00
Días de Llenado	0,02	-0,11	0,18	-0,27	0,30

Las otras variables modifican su importancia relativa dependiendo de las condiciones de manejo hídrico; por ejemplo, bajo condición de riego el índice de cosecha, días a maduración y días a llenado poseen un mayor peso, no siendo así en sequía.

Otro comportamiento de interés es el caso del peso de 100 semillas, que adquiere una importancia mayor bajo condición de sequía permitiendo así identificar genotipos con respuestas distintas ante esa condición de estrés.

condiciones de campo. Por otro lado, es una variable fácil de medir, de rápida ejecución y con bajos requerimientos de insumos.

Cuadro 52. Coeficientes de correlación (r) entre las variables morfo-fisiológicas evaluadas en invernadero y Biomasa viva (%) en condiciones de déficit hídrico severo.

Variables	Biomasa viva (%)
AF 0 días	-0.02
AF 7 días	0.17
AF 14 días	0.31
AFE 0 días	-0.04
AFE 7 días	-0.13
AFE 14 días	0.16
SAPD 0 días	0.2
SPAD 7 días	0.36*
SPAD 14 días	0.45**
Biomasa total (gr)	0.13

AF: Área foliar (cm²), AFE: Área foliar específica (cm².gr⁻¹). Valores de r con * y ** indican significancia estadística para p<0.05 y p<0.01, respectivamente.

Para que una característica pueda ser utilizada como criterio de selección no solo debe estar correlacionada con el rendimiento. Además, debe ser una variable con un alto grado de determinación genética. Dicha característica permite a una variable ser reproducible y a efectos del mejoramiento genético permite una selección eficiente pues indica que la mayor variabilidad observada se debe a las diferencias expresadas entre los genotipos y no a un efecto ambiental.

Es por ello que, partiendo de los cuadrados medios obtenidos en los análisis de varianza de cada ensayo se procedió a calcular la heredabilidad en sentido amplio de las variables seleccionadas anteriormente. El número de vainas por planta junto con el peso de 100 semillas y la Biomasa viva (%) presentaron una heredabilidad en

sentido amplio de 0.78, 0.84 y 0.75, respectivamente (Cuadro 52). Por otro lado, el índice de cosecha presentó una heredabilidad de 0.43.

De acuerdo a lo reportado por Polania (2011) valores de heredabilidad mayores a 0.5 son considerados altos y por ende, favorables para una variable. De esta manera, las variables vainas por planta, peso de 100 semillas y biomasa viva (%) presentaron una alta heredabilidad, y son recomendadas como criterios de selección.

Otras variables han sido seleccionadas por otros autores de acuerdo a su heredabilidad. Por ejemplo, Polanía (2011) recomendó las variables índice de cosecha de vaina ($h^2=0.61$), días a floración ($h^2=0.98$), discriminación de isótopo de carbono ($h^2=0.36$) y longitud total de raíz ($h^2=0.58$) como criterios de selección para la tolerancia a la sequía por presentar moderada a alta heredabilidad en sentido amplio.

Por otro lado, Riveiro (2012) reportó valores de heredabilidad para las variables vainas por planta y peso de 100 semillas de 0.46 y 0.82, respectivamente, al evaluar 47 genotipos de caraota en condiciones de sequía.

Además de las variables seleccionadas en base a su alta heredabilidad, las variables proporción de plantas erectas y días a mitad de llenado de vainas también serán consideradas a pesar de no poder estimar su heredabilidad debido a la imposibilidad de realizar los análisis de varianzas por ambiente.

Cuadro 53. Heredabilidad en sentido amplio (h^2) de las variables evaluadas en campo asociadas con el rendimiento en condiciones de sequía y Biomasa viva (%) evaluada en invernadero.

FV	Vainas por planta	Peso de 100 semillas	Índice de cosecha	Biomasa viva (%)
Bloque	1051.37	12.23	224.5	16.32
Genotipo	173.42	45.62	71.61	273.82
Error	37.34	6.9	40.44	66.14
h^2	0.7847	0.8488	0.4353	0.7585

Recomendación de Genotipos

Finalmente, una vez seleccionadas las variables útiles como criterios de selección para la tolerancia a la sequía se procedió a identificar a los genotipos que pueden ser recomendados como progenitores para el desarrollo de nuevas variedades así como cultivares para ambientes donde la sequía sea un factor limitante en la producción.

El Cuadro 53 presenta el comportamiento observado de los 21 genotipos evaluados para las variables recomendadas como criterio de selección, a saber, número de vainas por planta, peso de 100 semillas, proporción de plantas erectas, días a mitad de llenado de vainas y biomasa viva. Adicionalmente, son incluidos los valores de producción por planta en condiciones de riego y sequía así como un índice de tolerancia como lo es el porcentaje de reducción del rendimiento (%RD).

Los genotipos recomendados como progenitores fueron 'Tiziú', I-2019, I-2041, I-2583, I-2595, UCV-56 y UCV-88. Por otro lado los genotipos recomendados como cultivares fueron I-2583 y UCV-56. A continuación se realiza una breve descripción de cada genotipo recomendado.

'Tiziú': Este genotipo es un cultivar comercial procedente de Brasil. Presentó valores de % de reducción del rendimiento por debajo de la media de todo el ensayo, un alto % de biomasa viva en condiciones de déficit hídrico severo en invernadero y tiene una buena capacidad de recuperación ante el estrés hídrico, lo cual es evidenciado por un aumento en los días de mitad de llenado de vaina junto con un mayor número de vainas por planta en condiciones de sequía.

I-2019: Es una variedad local. Presentó un alto % de biomasa viva en condiciones de déficit hídrico severo en invernadero y tiene una alta capacidad de recuperación ante el estrés hídrico, evidenciado igualmente por un aumento sustancial en la producción de vainas por planta.

I-2041: Es una variedad local. Fue el genotipo que presentó el mayor % de biomasa viva en condiciones de déficit hídrico severo en invernadero así como un % de

reducción del rendimiento en campo menor al promedio general. A diferencia del resto de los genotipos, este cultivar no presentó una disminución significativa para los componentes de rendimiento peso de 100 semillas y número de vainas por planta. Este cultivar también fue evaluado por León (2014) en 6 localidades bajo una investigación de tipo participativa, manifestando un buen y estable comportamiento agronómico, aunado a buena aceptación por parte de los agricultores.

I-2583: Es una variedad local. Su comportamiento fue muy similar al expresado por el cultivar comercial 'Tiziú'. Sin embargo, dicho genotipo presentó una alta capacidad productiva tanto en condiciones de riego como en condiciones de sequía siendo recomendado tanto como progenitor como cultivar.

I-2592: Es una variedad local. Este genotipo fue seleccionado en base a su precocidad. Es el único con un comportamiento distinto y opuesto al expresado por el resto de los genotipos evaluados. Adicionalmente, el peso de 100 semillas no presentó una variación significativa a pesar del estrés.

UCV-56: Línea avanzada. Este genotipo presentó tanto el menor valor de % de reducción del rendimiento en condiciones de campo como el mayor % de biomasa viva en condiciones de déficit hídrico severo en invernadero. Por otro lado, tiene una alta capacidad productiva en condiciones de riego óptimo junto con una alta capacidad de recuperación ante los periodos de estrés por sequía posicionándolo como el más productivo en ambas condiciones. Dicho genotipo es recomendado tanto como progenitor como cultivar. Este cultivar también fue recomendado por León (2014) por presentar estabilidad y alta productividad en ambientes diferentes y buena aceptación por parte de los agricultores. Su comportamiento bajo déficit hídrico no había sido evaluado hasta el presente estudio, dándole una ventaja adicional.

UCV-88: Línea avanzada. Este genotipo no presentó características medibles asociadas a una mayor tolerancia a gusto personal presentó un comportamiento particular asociado a caracteres que le brindan robustez y vigor. Aunque ninguna variable considerada logra explicar lo visto en campo, es seleccionado por presentar

un ideotipo distinto al resto de los genotipos evaluados, lo cual lo hace interesante y atractivo a la vista del mejorador, siendo un ejemplo de lo que se conoce como el arte del mejoramiento genético de plantas.

Cabe destacar que la variedad comercial 'Tacarigua' no fue recomendada como progenitor ni como cultivar. De hecho, fue el genotipo que presentó tanto el mayor % de reducción del rendimiento en campo, como los rendimientos más bajos en condiciones de sequía, convirtiéndose en un nuevo testigo referencial susceptible ante tal condición.

Si bien es cierto que los criterios de selección para el desarrollo de esta variedad no fueron los relacionados a una mayor tolerancia a la sequía, este cultivar es uno de los más sembrados a nivel nacional, lo cual evidencia una alta vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático en la producción nacional de este rubro.

La magnitud de esta vulnerabilidad se incrementa ante la escasa existencia de programas de mejoramiento con objetivos definidos hacia el desarrollo de variedades tolerantes a la sequía y de alta productividad, así como la poca disponibilidad de nuevas variedades desarrolladas en el país.

Aun así, los resultados obtenidos en este trabajo permiten contar con un insumo básico para el inicio de un programa de mejoramiento genético en caraota, a su vez, que ofrecen herramientas valiosas para la continua valorización del germoplasma disponible para esta especie en nuestro país en el marco del pre-mejoramiento genético.

Cuadro 54. Recomendación de genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) como progenitor y/o cultivar en base a las variables asociadas con la tolerancia a la sequía.

Genotipo	Vainas por Planta			Peso de 100 Semillas		Plantas Erectas (%)		Días a mitad de llenado		Biomasa viva (%)	Gr por Planta			Selección	
	Riego	Sequía	RDI	Riego	Sequía	Riego	Sequía	Riego	Sequía		Riego	Sequía	% RD	Progenitor	Cultivar
'Manuare'	16.22	11.11	0.73	17.34	18.94	26.67	60	55	70	63.25	15.52	5.42	65.0		
'Tacarigua'	14	8.44	0.62	19.99	20.88	40	86.67	61	73	62.75	16.17	3.8	76.5		
'Tiziú'	21.11	23.67	1.18	16.87	12.92	100	100	66	80	70.44	15.07	8.96	40.5	X	
I-1997	13.78	15.56	1.4	19.17	17.19	100	100	64	73	70.81	15.25	5.65	63.0		
I-2011	17.44	16	0.9	18.5	15.67	100	100	66	74	55.3	19.16	5.37	72.0		
I-2019	18	29.83	1.74	20.48	15.88	93.33	100	64	73	80.73	16.3	7.56	53.6	X	
I-2041	17.34	20.28	1.5	21.93	20.42	60	86.67	66	73	91.57	18.01	9.58	46.8	X	
I-2155	15.33	9.67	0.63	17.69	16.99	26.67	33.33	64	73	59.57	15.76	4.26	73.0		
I-2216	19.56	11.11	0.61	17.55	20.07	100	100	66	73	71.12	20.45	6.45	68.5		
I-2218	19.89	7.78	0.4	15.47	19.87	60	60	66	73	74.68	16.01	5.05	68.5		
I-2363	17.55	15.33	1.03	21	18.42	66.67	100	64	73	57.75	15.39	7.81	49.3		
I-2368	19.78	18.11	0.97	18.15	16.87	73.33	100	66	73	71.07	16.99	7.85	53.8		
I-2494	17.89	13.06	0.77	18.05	18.97	73.33	93.33	66	82	-	16.08	6.01	62.7		
I-2581	20.56	19.78	1.1	18.24	17.15	100	100	64	73	68.86	18.96	9.91	47.7		
I-2583	20.44	25.91	1.33	17.79	14.46	93.33	100	66	73	70.24	17.96	10.37	42.3	X	X
I-2592	12.67	8.56	0.69	32.35	31.62	100	100	50	50	61.42	17.94	5.96	66.8	X	
Línea 13 (Gen 9)	20.48	9.33	0.46	19.84	21.88	100	100	66	73	-	19.22	6.32	67.1		
UCV-100	14.67	20.33	1.5	17.84	15.09	100	100	59	68	64.12	11.88	6.14	48.4		
UCV-56	22.11	36.57	1.78	19.69	16.76	100	100	58	70	86.92	21.76	15.38	29.3	X	X
UCV-88	18.22	21.42	1.23	17.85	15.49	100	100	66	73	73.46	15.9	8.28	47.9	X	
UCV-LINEA 16	22.64	15.81	0.76	19.55	21.95	100	100	66	73	77.53	20.12	8.85	56.0		

RDI: Índice Relativo de la sequía
 %RD: Reducción del rendimiento (%)

CONCLUSIONES

- La aplicación de tratamientos hídricos contrastantes en condiciones de campo permitió evidenciar el efecto detrimental del estrés por déficit hídrico observándose una reducción del rendimiento entre el 29.3% y 76.5%. Exponiendo la necesidad de programas de mejoramiento genético dirigido a la obtención de cultivares tolerantes al déficit hídrico.
- La metodología aplicada en campo permitió identificar genotipos de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) con mediana tolerancia a la sequía y alta productividad bajo condiciones de déficit hídrico. El genotipo UCV-56 presentó los mejores rendimientos tanto en condiciones de riego como en condiciones de sequía así como los mayores niveles de tolerancia entre los genotipos bajo estudio.
- El uso de índices de sequía asociados a tolerancia y productividad aplicados en variables agronómicas, morfológicas y fisiológicas permitió la identificación mecanismos de tolerancia expresados por algunos genotipos, los cuales pueden ser utilizados como progenitores a fin de mejorar la tolerancia a condiciones de déficit hídrico.
- La aplicación del déficit hídrico en condiciones de invernadero permitió identificar genotipos tolerantes a la sequía. Los genotipos UCV-56, I-2041 e I-2019 lograron mantener un alto % de biomasa viva a pesar del déficit hídrico.
- Las variables número de vainas por planta, peso de 100 semillas, proporción de plantas erectas, días a mitad de llenado de vainas y biomasa viva, presentaron correlación con rendimiento en ambiente con sequía, explican en alta proporción la diversidad de comportamiento por parte de distintos genotipos y presenta una buena heredabilidad en sentido amplio, por todo ello se les recomienda como variables útiles para la selección de genotipos tolerantes a la sequía.

- Finalmente, se identificaron genotipos de interés como progenitores para los programas de mejoramiento genético o como cultivares. Los genotipos recomendados como progenitores fueron 'Tiziú', I-2019, I-2041, I-2583, I-2595, UCV-56 y UCV-88. Por otro lado, los genotipos recomendados como cultivares fueron I-2583 y UCV-56.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, J., Acosta, E., Padilla, S., Goytia, M., Rosales, R., López, E. 1999. Mejoramiento de la resistencia a la sequía del frijol común en México. *Agronomía Meso-americana*. México, Chapingo. 10(1): 83-90.
- Acosta-Díaz, E., Trejo-López, C., Ruiz-Posadas, L., Padilla-Ramírez, S., Acosta-Gallegos, J. 2004. Adaptación del frijol a sequía en la etapa reproductiva. *Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.* México, Chapingo. 22(1): 49-58 pp.
- Acquaah, G. 2011. *Principles of plants genetics and breeding*. Primera edición. Massachusetts, Estados Unidos, Blackwell. 569p.
- Angola, C.C., J.G. Hernández. 2010. Evaluación Agronómica de líneas promisorias de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) en un enfoque de mejoramiento genético participativo. Trabajo de grado Ingeniero Agrónomo. Maracay, Venezuela; Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. 70 p.
- Banziger M., P. S. Setimela, D. Hodson, and B. Vivek. 2006. Breeding for improved drought tolerance in maize adapted to southern Africa. *Agricultural Water Management* 80: 212-224
- Beebe, S., Rao, I., Cajiao, C., Grajales, M. 2008. Selection for drought resistance in common bean also improves yield in phosphorus limited and favorable environments. *Crop. Sci.* 48: 582-592.
- Beebe, S., Rao, I., Blair, M., Acosta-Gallegos, J. 2013. Phenotyping common beans for adaptation to drought. *Frontiers in physiology*. 4 (35): 19.
- Ceballos, H. 1996. *Quantitative Genetics and Plant Breeding Manual* (In Spanish). Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 337 pp.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1984. Cruzamiento de caraota; guía de estudio para ser usada como complemento de la unidad Audiotutorial sobre el mismo tema. Cali, Colombia. 36p.
- Chantiro, S., Bokosi, J., Chirwa, R., Mkwaila, E. 2016. Effects of drought on yield and yield components of two contrasting growth habits of common beans

(*Phaseolus vulgaris* L.). African Journal of Agricultural Research. Malawi. 11(40): 3914-3921.

- Chaveco, O., Viana, A., Permuy, N., Chailloux, M., García, E., Miranda, E., Ojeda, R., Faure, B. 2001. Estudio de adopción en variedades de frijol en el municipio de Gibara. Informe Técnico Anual 2000-2001. Programa Cooperativo Regional de Frijol para Centro América, México y el Caribe. Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- Chen, X., Velten, X., Stout, D. 2012. Characterization of maize inbred lines for drought and heat tolerance. Journal of Soil and Water Conservation. 67(5):354-364.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) a. Versión on-line (<http://ongoing-research.cgiar.org/project-tags/bean/>) 9 de diciembre de 2016.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) b. Versión on-line (<http://isa.ciat.cgiar.org/urg/beancollection.do>) 9 de diciembre de 2016.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S. 2009. Plant drought stress: mechanisms and management. Agronomy for Sustainable Development. 29(1):185-212.
- FEDEAGRO. Versión online (<http://www.fedeagro.org/produccion/Rubros.asp>). 9 de octubre de 2015.
- Feng, Baili. Yu, H. Hu, Y. Gao, X. Gao, J. Gao, D and Zhang S. 2009. The physiological characteristics of the low canopy temperature wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under simulated drought condition. Acta Physiol Plant 31:1229-1235
- Gepts, P., Debouck, D. 1991. "Origin, Domestication, and Evolution of the Common Bean". Common Beans Research for Crop Improvement (1): 7-53.
- Gómez, K.; A. Gómez. 1984. Statistical procedures for agricultural research. John Wiley & Sons. New York. USA. 680 p.
- Hidalgo, R. (2003). Variabilidad Genética y Caracterización de Especies Vegetales: Análisis estadístico de datos de caracterización morfológica de recursos filogenéticos. Boletín técnico IPGRI N° 8. Cali, Colombia.

- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. Versión online. (http://www.ine.gov.ve/index.php?option=com_content&view=category&id=95&Itemid=9). 9 de octubre 2015
- IPGRI. 2001. Descriptores para *Phaseolus vulgaris*. International Board of Plant Genetic Resources Institute. Rome. Italy. 45p.
- Khan, H., W. Link, T.J. Hocking and F.L. Stoddard, 2007. Evaluation of physiological traits for improving drought tolerance in faba bean (*Vicia faba* L.). *Plant Soil.*, 292: 205-217.
- Klaedtke, S., Cajiao, C., Grajales, M., Polania, J., Borrero, G., Guerrero, A. 2012. Photosynthate remobilization capacity from drought-adapted common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines can improve yield potential finter- specific populations within the secondary gene pool. *J. Plant Breed. Crop Sci.* 4: 49–61.
- Kokubun M., Shimada S., Takahashi, M. 2001. Flower abortion caused by preanthesis water deficit is not attributed to impairment of pollen in soybean. *Crop Sci.* 41:1517-1521.
- León, O. 2014. Evaluación cultivares locales y mejorados de caraota (*P. vulgaris* L.) mediante la integración de técnicas de mejoramiento genético convencional y participativo y análisis molecular. Tesis Doctoral. Venezuela.
- Mace, E., Singh, V., Van Oosterom, E., Hammer, G., Hunt, C. y Jordan, D. 2012. QTL for nodal root angle in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) co-located with QTL for traits associated with drought adaptation. *Theor. Appl. Gener.* 124: 97-109.
- Mayor, V. 2010. Evaluación de líneas de caraota común andino (*Phaseolus vulgaris* L.) provenientes de cruza intra7inter acervo para tolerancia a sequía. 2010. Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ciencias Agrarias, Área de Fito-mejoramiento. Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia.

- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., Gulías, J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas* 43: 63-84.
- Moyeja, J. 1997. Resistencia a la sequía en *Phaseolus vulgaris* L.: un enfoque agro-eco-fisiológico. Trabajo de grado para optar al título de Doctor en ecología tropical. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
- Mukeshimana, G., Lasley, A., Loescher, W., Kelly, J. 2014. Identification of shoot traits related to drought tolerance in common bean seedlings. *J. Amer. Soc.* 139(3): 299-309.
- Pastor-Corrales, M. Schwartz, H. 1994. Problemas de producción en trópicos. Centro Internacional de Agricultura Tropical. 734 p.
- Perdomo, M. 2014. Evaluación de genotipos de arroz (*Oryza sativa*) para tolerancia a estrés hídrico. Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ciencias Agrarias, Área de Fito-mejoramiento. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela.
- Pérez, D.; N. Camacaro; M. E. Morros; A. Higuera. 2013. Leguminosas de grano comestible en Venezuela. caraota, frijol y quinchoncho. *Agricultura en Venezuela* N° 1. José Luis Berroterán (Editor). Ediciones ONCTI, Caracas (Venezuela). 157 p.
- Polania, J. 2011. Identificación de características morfo-fisiológicas asociadas a la adaptación a sequía para ser usadas como criterios de selección en mejoramiento de caraota común *Phaseolus vulgaris* L. Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ciencias Agrarias, Área de Fito-mejoramiento. Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia.
- Polania, J., Rao, I., Beebe, S., García, R. 2009. Desarrollo y distribución de raíces bajo estrés por sequía en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en un sistema de tubos con suelo. *Agronomía Colombiana* 27(1):25-32.
- Polania, J., Rao, I., Mejía, S., Beebe, S., Cajiao, C. 2012. Características morfo-fisiológicas de caraota común (*Phaseolus vulgaris* L.) relacionados con la adaptación a sequía. *Centro Internacional de Agricultura Tropical*. 5 p.

- Polon, R., Miranda, A., Maqueria, L., Ramírez, M. 2013. Efecto de diferentes intensidades de estrés hídrico en la fase vegetativa en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Cuba. 22(4):60-64.
- Pritsch, C. 2001. El pre-mejoramiento y la utilización de los recursos fito-genéticos. Estrategia en recursos fito-genéticos para los países del Cono Sur. PROCISUR. 10p.
- Riveiro, M. 2012. Tolerancia de variedades de judía a estrés hídrico estacional e implicaciones en la fijación simbiótica de nitrógeno. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela, España. 284 p.
- Rodríguez, O. J. L. 1992. Notas del Curso de Resistencia a Sequía. CP. Centro de Genética. Montecillos, México. 325 p.
- Rodríguez, O., Chaveco, O., Ortiz, R., Ponce, M., Ríos, H., Miranda, S., Días, O. Portelles, Y. Torres, R., Cedeño, L. 2009. Líneas de caraota común (*Phaseolus vulgaris* L.) resistentes a la sequía. Evaluación de su comportamiento frente a condiciones de riego, sin riego y enfermedades. Toma de ciencia y tecnología. 13 (38): 17-26.
- Rosales-Serna, R., Ramírez, R., Acosta-Gallegos, P. V., Castillo F. G., Kelly, J. D. 2000. Rendimiento de grano y tolerancia a la sequía del frijol común en condiciones de campo. Agrociencia, 34, 153-165.
- Tosquy-Valle, O., López-Salinas, E., Francisco-Nicolás, N., Acosta-Gallegos, J., Villar-Sánchez, B. 2014. Genotipos de frijol negro opaco resistentes a sequía terminal. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 5(7): 1205-1217.
- Tuberosa, R. 2012. Phenotyping for drought tolerance of crops in the genomics era. Frontiers in Physiology. 3:347
- Trapp, J., 2015. Genetics of drought tolerance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Tesis doctoral. Washington State University, United State. 148p.
- Voysest, O. 2000. Mejoramiento Genético del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) legado de variedades de América Latina 1930 – 1999. Publicación CIAT N° 321. ISBN 958-694-032-2 3-6 pp.

- Williams, J., Jackson, S., Kutzbach, J. 2007. Projected distribution of novel and disappearing climates by 2100 AD. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 104: 5738-5742.
- Zheng, H., Wu, A., Zheng, C., Wang, Y., Cai, R., Shen, X., Xu, R., Liu, P., Kong, L. y Dong, S. 2009. QTL mapping of maize (*Zea mays*) stay-green traits and their relationship to yield. Plant Breed. 128: 54-62.