



# UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE POSTGRADO

## ADAPTACIÓN DE GENOTIPOS DE AMARANTO (*Amaranthus cruentus* y *Amaranthus hypochondriacus*) PARA PRODUCCIÓN DE GRANOS EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE

TESIS

Para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster  
en Ciencias Agropecuarias

**DANIEL ANDRÉS CUBILLOS BECERRA**

Directoras de Tesis  
CECILIA BAGINSKY GUERRERO  
PAOLA SILVA CANDIA

Santiago de Chile  
2020

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**

ADAPTACIÓN DE GENOTIPOS DE AMARANTO (*Amaranthus cruentus* y  
*Amaranthus hypochondriacus*) PARA PRODUCCIÓN DE GRANOS EN LA  
ZONA CENTRAL DE CHILE

Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al Grado de  
Magíster en Ciencias Agropecuarias

**DANIEL ANDRÉS CUBILLOS BECERRA**

	Calificaciones (Memoria de Título)	Calificaciones (Tesis de Grado)
<b>DIRECTORAS DE TESIS</b>		
Cecilia Baginsky Guerrero Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,0	6,0
Paola Silva Candia Ingeniero Agrónomo, MS., Dr.	6,8	6,8
<b>PROFESORES CONSEJEROS</b>		
Ricardo Pertuzé Concha Ingeniero Agrónomo, Ph..D.	6,5	6,5
Carlos Muñoz Schick Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	6,0	6,0

Santiago, Chile  
2020

**ADAPTACIÓN DE GENOTIPOS DE AMARANTO (*Amaranthus cruentus*  
y *Amaranthus hypochondriacus*) PARA PRODUCCIÓN DE GRANOS EN  
LA ZONA CENTRAL DE CHILE**

## AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

Dedicado a mi familia, principalmente a mis padres Alvarita y Florentino, por todos los años de esfuerzo, confianza y dedicación que me han entregado, al constante apoyo e incentivo a mejorar y progresar en mi vida, sin importar las circunstancias de ésta. A mi polola, Valentina Romero, por el gran apoyo, compañía y motivación, al inicio y al fin de mi vida universitaria, quien ha sido un gran pilar para poder culminar este proceso.

A mis profesoras guía Paola Silva y Cecilia Baginsky, por los constantes consejos, paciencia y apoyo, sobre todo paciencia. A mis demás profesores, y especialmente a quienes de una u otra manera se hicieron partícipes de mi vida universitaria, sobre todo a Nicolás Frank, Ricardo Pertuzé, Verónica Díaz y Óscar Seguel, quienes fueron un constante apoyo e inspiración dentro de la universidad, a quienes también admiro como personas y profesionales. A quienes me ayudaron en la realización de la tesis y quienes también fueron como compañeros en los trabajos experimentales; Don Carlos Meza con quien no faltaba de qué reír y comentar mientras trabajábamos junto a Ariel o Lautaro.

A Walter Vergara quien ha sido un mentor y amigo, quien me ayudó, me apoyó y se burló en distintos momentos desde que entré a la universidad. A mis compañeros de generación con quienes viví incontables anécdotas, sobre todo a mis amigos más cercanos; Eduardo Espinoza, Cristian Guevara, Daniela Carvajal, Camila Argomedo, Valentina Gallegos, Stefan Di Pietrantonio, Gonzalo Mena, Diego Barahona, Adolfo Pardo, Gonzalo Vidal, Pablo Salgado. A los del equipo de voleibol Ricardo Quintana, Héctor Rivera, Diego Fredes, Diego Zavala, Mauricio Lecaros, Miguel Valladares y muchos otros, les digo: muchas gracias por el apoyo, el tiempo compartido y por su amistad!

También muchas gracias al enviado especial de la tesis Fernando Quezada. Como también a quienes me arrendaron habitaciones y siempre me prestaron ayuda cuando la necesité, Sra. Claro, Sra. María y Sra. Emma.

A la Sra. Jeannette Piza por toda la orientación, ayuda y paciencia que ha tenido con nosotros los estudiantes desorientados, a quienes atiende siempre con cariño y dedicación. A todos los funcionarios que trabajaron y trabajan en la universidad, ya que gracias a ellos pude disponer de un ambiente grato para cumplir con todas las obligaciones que tuve como estudiante.

Ha sido un largo camino, con altos y bajos, que me ha dejado muchas enseñanzas y me ha formado en una carrera por la cual desde pequeño anhelé estudiar y estoy muy contento de haberla elegido desde que tengo memoria.

**ÍNDICE**

INTRODUCCIÓN .....	1
HIPÓTESIS .....	3
OBJETIVOS .....	3
MATERIALES Y MÉTODO .....	4
Genotipos .....	4
Ambientes .....	4
Diseño experimental .....	5
Manejo de los ensayos .....	5
Mediciones .....	6
Análisis estadístico .....	7
RESULTADOS .....	9
Características de los ambientes .....	9
Rendimiento y variables medidas en los ambientes .....	10
Rendimiento y variables medidas por genotipo y especie .....	10
Análisis de la interacción GxA .....	16
Relación entre el rendimiento, sus componentes y las variables medidas .....	20
Efecto del largo de día sobre la fenología .....	21
DISCUSIÓN .....	25
CONCLUSIÓN .....	27
LITERATURA CITADA .....	28

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Listado de los genotipos y su respectiva especie.....	6
Cuadro 2. Nombre de los ambientes con sus respectivas fechas de siembra en cada una de las localidades evaluadas.....	7
Cuadro 3. Características de los diferentes ambientes en términos de largo de ciclo de los genotipos, duración del día, temperatura media y radiación solar. ....	11
Cuadro 4. Contenido de agua en los suelos de San Fernando e Isla de Maipo. Capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y humedad aprovechable (HA).. .....	11
Cuadro 5. Promedio de las variables medidas en cada ambiente. ....	12
Cuadro 6. Promedio de las variables medidas según cada genotipo. ....	13
Cuadro 7. Fenología de los genotipos de Amaranto en los ambientes de Isla de Maipo y San Fernando. ....	14
Cuadro 8. Porcentaje de la suma de cuadrados de cada variable medida.....	16
Cuadro 9. Valores de rendimiento promedio, coeficiente de regresión ( <i>b</i> ) y $R^2$ resultante de la regresión lineal de ocho genotipos y su media por especie en cuatro ambientes. ....	17
Cuadro 10. Grupos de genotipos según el análisis de conglomerados.....	21
Cuadro 11. Fotoperiodos al momento de IEP y F, para los grupos 1 y 2.....	21

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dendrograma correspondiente al análisis de conglomerado hecho con los ocho genotipos y las variables altura de planta, largo de panoja y la fenología (inicio de emisión de panoja, floración y madurez fisiológica). .....	15
Figura 2. Análisis de estabilidad del rendimiento para ocho genotipos dispuestos en cuatro ambientes. ....	17
Figura 3. Análisis de estabilidad del rendimiento para las dos especies de amaranto dispuestas en cuatro ambientes. ....	18
Figura 4. Efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI1) para ocho genotipos en cuatro ambientes. ....	19
Figura 5. AMMI2 para el rendimiento de ocho genotipos, tres de <i>A. cruentus</i> (puntos rojos) y cinco de <i>A. hypochondriacus</i> (puntos verdes), dispuestos en cuatro ambientes (vectores con puntos amarillos). ....	20
Figura 6. Análisis de componentes principales (ACP) del comportamiento de los ocho genotipos (tres <i>A. cruentus</i> con puntos de color rojo y cinco <i>A. hypochondriacus</i> con puntos de color verde) respecto de las variables medidas (vectores con punto amarillo) en los cuatro ambientes estudiados. IEP: Inicio de emisión de panoja. F: Inicio de floración. MF: Madurez fisiológica. IC: Índice de cosecha. N°Gm-2: Número de granos m <sup>-2</sup> . P1000: Peso de 1.000 granos. BM: Biomasa. Rend: Rendimiento. ....	21
Figura 7. Efecto del largo de día sobre la fenología de los dos grupos de genotipos en el ambiente IMSep2017. ....	22
Figura 8. Efecto del largo de día sobre la fenología de los dos grupos en el ambiente IMDic2017. ....	23
Figura 9. Efecto del largo de día sobre la fenología de los dos grupos en el ambiente SFDic2017. ....	23
Figura 10. Efecto del largo de día sobre la fenología de los dos grupos en el ambiente SFene2018. ....	24

**ANEXOS**

Anexo I. Rendimiento promedio de cada genotipo en los ambientes de Isla de Maipo y San Fernando. ....	31
Anexo II. Biomasa promedio de cada genotipo en los ambientes de Isla de Maipo y San Fernando. ....	31
Anexo III. Matriz de correlación/coeficientes del análisis de componentes principales ocho genotipos en cuatro ambientes.....	32
Anexo IV. Autovalores del ACP hecho con los ocho genotipos en cuatro ambientes respecto de todas las variables.....	32
Anexo V. Autovectores del ACP hecho con los ocho genotipos en cuatro ambientes respecto de todas las variables.....	33

## RESUMEN

El amaranto es un cultivo ancestral Mesoamericano que posee una gran diversidad genética y fenotípica, por lo que para cultivarlo en la zona central de Chile es necesario conocer el efecto que tiene el ambiente sobre el comportamiento de algunos genotipos. El objetivo de este estudio fue analizar la adaptación de *Amaranthus cruentus* y *Amaranthus hypochondriacus*, bajo diferentes condiciones ambientales en la zona central de Chile. Para esto, se probaron 8 genotipos de amaranto en 4 ambientes (2 localidades en 2 fechas de siembra) durante la temporada 2017-2018, estableciéndose el ensayo en un diseño de bloques completos al azar. En cada ambiente se evaluó rendimiento y sus componentes, biomasa aérea, índice de cosecha, altura de plantas, largo de panojas y la fenología del cultivo. Se realizó además un análisis combinado de la varianza, análisis de conglomerados, análisis de estabilidad, AMMI1, AMMI2 y análisis de componentes principales. Los resultados muestran que los genotipos *A. cruentus* poseen mayor rendimiento y estabilidad que *A. hypochondriacus*, sin embargo, existe interacción genotipo ambiente (GxA) provocada principalmente por los genotipos de *A. hypochondriacus*. Por otro lado, se identificaron 4 genotipos (3 de *A. cruentus* y 1 de *A. hypochondriacus*) insensibles a fotoperíodo y 4 genotipos (*A. hypochondriacus*) sensibles a fotoperíodo de día corto.

Palabras clave: Interacción genotipo ambiente, fotoperíodo, fecha de siembra.

**ABSTRACT**

Amaranth is an ancestral mesoamerican crop with a great genetic and fenotipic diversity, to cultivate in central zone of Chile it's necessary to know the environment effect on the performance of genotypes. The objective of this study was analyze the adaption of *Amaranthus cruentus* and *Amaranthus hypochondriacus*, under different environmental conditions in the central zone of Chile. For this, 8 genotypes of amaranth was tested in 4 environments (2 locationes in 2 sowing date) during season 2017-2018, setting a test in a randomized complete block design. In every environment was measured grain yield and his components, aerial biomas, harvest index, plant high, panicle lenght and crop phenology. Later it has been made a combined analysis of variance, cluster analysis, stabiliy analysis, AMMI1, AMMI2 and principal component analysis. The results show *A. cruentus* genotypes have higher yield grain and stability than *A. hypochondriacus*, nevertheless, exists genotype environment interaction (GxE) induced mainly by *A. hypochondriacus* genotypes. Furthermore, was identified 4 genotypes (3 *A. cruentus* and 1 of *A. hypochondriacus*) insensitive to photoperiod and 4 genotypes (*A. hypochondriacus*) sensitives to short photoperiod day.

Key words: Gentype environment interaction, photoperiod, sowing date.

## INTRODUCCIÓN

El amaranto es un pseudocereal con metabolismo  $C_4$  que pertenece al género *Amaranthus*, dentro del cual se pueden encontrar más de 87 especies, destacando *A. cruentus*, *A. hypochondriacus* y *A. caudatus* como especies cultivables para la producción de granos (Jacobsen y Sherwood, 2002). El amaranto crece y se desarrolla de mejor manera en climas cálidos, por lo que está distribuido desde el trópico hasta las regiones semiáridas (Corke and Cai, 2016). Es importante mencionar que tanto la diversidad genética como fenotípica varían de acuerdo a las características ecogeográficas del lugar de origen, lo que determinará una selección genética específica, por lo tanto, al cambiar los genotipos de un ambiente a otro cambiará el grado de expresión de los caracteres de estos genotipos (Curti *et al.*, 2014). Las distintas especies de amaranto, incluyendo las especies cultivadas, están adaptadas a diferentes condiciones edafoclimáticas, que en general son poco favorables para los cultivos tradicionales. Sus centros de origen se encuentran en Ecuador, México y Perú, en alturas que oscilan entre 1.000 y 2.500 m.s.n.m. En estos lugares, bajo condiciones experimentales de secano húmedo, el amaranto presenta rendimientos que alcanzan los 2.000 kg ha<sup>-1</sup> y algunas variedades seleccionadas logran rendir sobre 3.700 kg ha<sup>-1</sup> (Jacobsen y Sherwood, 2002).

*A. cruentus* y *A. hypochondriacus* difieren en el rendimiento de grano según la altitud donde son cultivadas, debido a una adaptación diferencial a la temperatura producto de la altitud (Schahbazian *et al.*, 2006; García *et al.*, 2009; Espitia *et al.*, 2010; García *et al.*, 2011). Se ha observado que *A. cruentus* puede rendir más que *A. hypochondriacus* en zonas con clima templado cálido donde las temperaturas máximas en floración pueden llegar a los 40°C, mientras que *A. hypochondriacus* puede tener un mayor rendimiento que *A. cruentus* en zonas con temperaturas medias máximas menores a 27°C (Alvarado *et al.*, 2004; García *et al.*, 2009). En este aspecto cabe destacar que en la zona central de Chile, específicamente en la depresión intermedia, las temperaturas medias máximas en el período de primavera verano superan los 28° C (Santibáñez y Uribe, 1990; Santibáñez y Uribe, 1993).

Producto de la adaptación del amaranto según sus diferentes orígenes se ha identificado sensibilidad al fotoperiodo, donde se ha reconocido principalmente una respuesta al fotoperiodo de día corto (Barrales *et al.*, 2010; Ramírez *et al.*, 2010), es decir, que en general el amaranto necesita días cortos para expresar de mejor manera la floración; de no ser así, la floración podría verse retrasada o simplemente no ocurrir. También se ha descrito que algunos genotipos requieren día neutro para florecer (NRC, 1984; Nieto, 1986; Mbwambo, 2013; Casini and La Rocca, 2014). Esta condición tiene una implicancia directa con la adaptación de un genotipo a un ambiente determinado, ya que influye en la coincidencia entre

la fecha de floración del genotipo y las condiciones ambientales que sean favorables para el crecimiento y desarrollo del genotipo (De Vita *et al.*, 2010).

Actualmente en Chile no hay variedades comerciales de amaranto disponibles para su cultivo, solo la Universidad de Chile posee un genotipo logrado por selección masal, que ha sido cultivado por ocho temporadas en el país, sin embargo, para aumentar la disponibilidad de genotipos se introdujeron variedades comerciales desde México. Para el estudio de estos genotipos es importante analizar la adaptación y el efecto que genera el cambio de ambiente en el rendimiento del cultivo así como conocer si existe interacción genotipo ambiente (GxA), que se puede entender como un cambio en el comportamiento en el rendimiento, que hace variar la elección del genotipo. Así por ejemplo, un genotipo que tiene el más alto rendimiento en una localidad no necesariamente será el de mayor o el único de mayor rendimiento en todas las localidades, incluyendo combinaciones localidad-año los que se pueden considerar como ambientes totalmente diferentes (Satorre *et al.*, 2003). A partir de la variación en el comportamiento de los genotipos es posible conocer si existe o no interacción, ya que, de no existir la interacción, la elección del genotipo no sería un problema debido a que el mismo genotipo será el de mayor rendimiento en todos los ambientes (Frutos, 2011). En caso de existir interacción GxA, la elección del genotipo se dificulta ya que se requiere de estudios adicionales para elegir el genotipo con mayor adaptación a un ambiente en particular (Satorre *et al.*, 2003).

Para realizar el análisis de interacción GxA se realizan ensayos multi-ambientes donde se evalúan genotipos en un número definido de ambientes, en los cuales se espera que los genotipos puedan expresar todas las características que le confieran algún grado de adaptabilidad a los ambientes, considerando que la respuesta obtenida es un rango medio de la expresión fenotípica (Van Eeuwijk *et al.*, 2005).

El comportamiento de los genotipos al ser probados en un determinado número de ambientes puede ser clasificado según su adaptación, existiendo genotipos con adaptación específica que hace referencia a los genotipos que poseen altos rendimientos en algún ambiente en particular, el cual posee una condición ambiental que no se encuentra en otros ambientes (De Vita *et al.*, 2010) y adaptación amplia, lo que implica que el genotipo estudiado posee respuestas similares en los ambientes en que fue evaluado, por lo que el genotipo posee una adaptación a las diferentes condiciones ambientales (De Vita *et al.*, 2010).

Debido a todo lo mencionado, es de suma importancia analizar la adaptación de los genotipos de amaranto para identificar qué genotipo o genotipos tiene o tienen una mayor adaptación a la zona central de Chile, de tal forma de obtener los mayores rendimientos posibles en cada ambiente en que pueda ser cultivado. De acuerdo a los antecedentes recopilados existe una mayor probabilidad que los genotipos *A. cruentus* tengan una mayor adaptación que *A.*

*hypochondriacus* debido a que las condiciones a las que están adaptados los genotipos *A. cruentus* son similares a las de la zona central de Chile (Alvarado *et al.*, 2004; Schahbazian *et al.*, 2006; García *et al.*, 2009; Espitia *et al.*, 2010; García *et al.*, 2011).

## **HIPÓTESIS**

En la Zona Central de Chile los genotipos pertenecientes a la especie *Amaranthus cruentus* presentan una mayor adaptación que la especie *Amaranthus hypochondriacus*.

## **OBJETIVOS**

### Objetivo general

Analizar la adaptación de *Amaranthus cruentus* y *Amaranthus hypochondriacus*, bajo diferentes condiciones ambientales en la zona central de Chile.

### Objetivos específicos

1. Evaluar el crecimiento y fenología de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* en cuatro ambientes de la Zona Central de Chile.
2. Comparar el rendimiento de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* en cuatro ambientes de la Zona Central de Chile.
3. Relacionar las variables de crecimiento y fenología de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus*.

## MATERIALES Y MÉTODO

### Genotipos

Se utilizaron 8 genotipos de amaranto (3 de la especie *Amaranthus cruentus* y 5 *Amaranthus hypochondriacus*), 1 obtenido de Chile y 7 provenientes de México. Su detalle se observa en el Cuadro 1.

Todos los genotipos, excepto CB-01, provienen de la Universidad Autónoma Metropolitana, Campus Iztapalapa, México. Por su parte CB-01 es un genotipo de *Amaranthus cruentus* L., adaptado a la zona central del país, producto de selección masal en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (Baginsky, 2017)<sup>1</sup>.

Cuadro 1. Listado de los genotipos y su respectiva especie.

Especie	Nombre del genotipo
<i>Amaranthus cruentus</i>	CB-01
<i>Amaranthus cruentus</i>	Amaranteca
<i>Amaranthus cruentus</i>	Benito
<i>Amaranthus hypochondriacus</i>	PQ2
<i>Amaranthus hypochondriacus</i>	Diego
<i>Amaranthus hypochondriacus</i>	Areli
<i>Amaranthus hypochondriacus</i>	Revancha
<i>Amaranthus hypochondriacus</i>	Nutrisol

### Ambientes

Los genotipos fueron evaluados durante la temporada 2017-2018 en la Estación Experimental del Liceo Agrícola el Carmen ubicado en Longitudinal Sur km 140 Oriente, San Fernando (34°36'23,6" S; 70°58'41.6" O, y 350 m.s.n.m.) y en el predio comercial Chacra Dolores ubicada en el Sector "La Villita", Isla de Maipo (33°46'35,34" S; 70°53'53,85" O, y 342 m.s.n.m.).

**San Fernando.** El clima es templado mesotermal inferior estenotérmico mediterráneo semiárido. Las temperaturas varían entre una máxima promedio de 28,9°C y una mínima promedio de 4,2°C. Registra al año 1.658 días-grado (temperatura en base 10) y 1.234 horas de frío (temperatura base 7°C) y una precipitación anual de 753 mm (Santibáñez y Uribe, 1993). El suelo corresponde a la serie Talcahue (Fluventic Xerochrepts) de clase textural

<sup>1</sup>Baginsky, C. 2017, Ago. Genotipos de amaranto en Chile. [Comunicación oral]. Santiago, Departamento de Producción Agrícola. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

franca a franco arcillo limosa en superficie y franco arcillo limosa en profundidad. La profundidad efectiva del suelo varía entre 50 y 120 cm y un pH de 6,0 (CIREN, 1996<sup>b</sup>).

**Isla de Maipo.** El clima es templado mesotermal estenotérmico mediterráneo semiárido. Las temperaturas anuales varían entre una máxima promedio de 28,2°C y una mínima de 10,2°C. Registra anualmente 1.621 días-grado (temperatura base 10°C), 1.147 horas frío (temperatura base 7°C) y una precipitación media anual de 419 mm (Santibáñez y Uribe, 1990). El suelo pertenece a la serie Isla de Huechún (Fluventic Haploxeroll) de clase textural areno francosa fina; de origen aluvial, estratificado que se presenta ocupando las terrazas bajas y las planicies de inundación del Río Maipo. La profundidad efectiva del suelo es de 60 cm y un pH de 8,1 (CIREN, 1996<sup>a</sup>).

En cada localidad, se evaluaron dos fechas de siembra bajo riego, contabilizando un total de cuatro ambientes (Cuadro 2).

Cuadro 2. Nombre de los ambientes con sus respectivas fechas de siembra en cada una de las localidades evaluadas.

Ambiente	Localidad	Temporada	Fecha de siembra
IMSep2017	Isla de Maipo	2017-2018	29 de septiembre
IMDic2017	Isla de Maipo	2017-2018	21 de diciembre
SFDic2017	San Fernando	2017-2018	19 de diciembre
SFEne2018	San Fernando	2017-2018	11 de enero

### **Diseño experimental**

En cada ambiente se establecieron los genotipos en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Cada unidad experimental correspondió a una parcela de 3,5 m de ancho y 5 m de largo, con 5 hileras separadas a 0,7 m.

### **Manejo de los ensayos**

El suelo fue preparado con arado de vertedera y posteriores rastrajes hasta conseguir una cama de semillas mullida. La siembra fue manual con una dosis de semilla equivalente a 1 kg ha<sup>-1</sup>, posteriormente se hizo raleo manual buscando establecer una densidad de 14 plantas m<sup>-2</sup>, con una distribución de 0,1 x 0,7 m. Las parcelas fueron fertilizadas para llegar a una disponibilidad de 100 kg de nitrógeno ha<sup>-1</sup> y además se mantuvieron libres de malezas, mediante control mecánico. Se hicieron análisis de las propiedades físicas del suelo para conocer la capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Las parcelas fueron regadas mediante un sistema de riego presurizado, el que consistió en cintas de riego cuyos goteros presentaban un caudal de 8 L h<sup>-1</sup> y una distancia de 0,15 m entre ellos. En todos los ambientes se consideró un umbral de riego (UR) de 50%. La frecuencia y tiempo de riego se

calcularon de acuerdo a la evapotranspiración del cultivo y la humedad de déficit permitida de acuerdo al UR utilizado.

### **Datos climáticos y largo de día**

Los datos climáticos utilizados se obtuvieron de la página web del INIA (agromet.inia.cl), de las estaciones El Tambo, para San Fernando y San Antonio de Naltahua para Isla de Maipo (Agromet, 2018) Los datos del largo de día se obtuvieron de la página web sunrise-and-sunset.com de las localidades de San Antonio y Rancagua (Sunrise and sunset, 2018).

### **Mediciones**

**Fenología.** Se determinaron los siguientes estados fenológicos del cultivo: inicio de emisión de panoja, inicio de floración y madurez fisiológica; para lo cual se realizaron visitas periódicas a cada localidad. Para determinar los días a inicio de emisión de panoja se utilizó como criterio un 50% de las plantas con la panoja visible de 1 cm de longitud. El inicio de floración se consideró cuando las plantas presentaban panojas con al menos un 5% de sus flores abiertas. El estado de madurez fisiológica se determinó cuando los granos del tercio central de la panoja estaban cristalinos, “ojo de gato” (Ortiz, 2017)<sup>1</sup>.

**Biomasa aérea total (kg ha<sup>-1</sup>).** Esta medición se hizo posterior al estado de madurez fisiológica. Se cortó a nivel de suelo 3 m lineales de plantas de las 3 hileras centrales (6,3 m<sup>2</sup>). Posteriormente las muestras fueron secadas en estufa de secado a 70°C por tres días hasta lograr un peso constante.

**Rendimiento de granos (kg ha<sup>-1</sup>) y componentes del rendimiento.** Se midió en las mismas plantas en que se midió biomasa total. Para ello, posterior al secado, las panojas fueron trilladas manualmente frotándolas contra un harnero. Los granos limpios fueron pesados, luego se contaron 1.000 granos los que también fueron pesados. El número de granos m<sup>2</sup> se obtuvo a partir del cociente entre el rendimiento (expresado en kg m<sup>2</sup>) y el peso de 1.000 granos (expresado en g).

**Altura de planta (m).** Se midió en madurez fisiológica desde ras de suelo hasta donde comienza la panoja con una huincha de medir.

**Largo de panoja (m).** Se midió desde la base hasta la punta más distante de la panoja.

**Índice de cosecha.** Con los valores de biomasa total y rendimiento de granos se calculó el índice de cosecha (IC) como se muestra a continuación.

**Índice de cosecha= Rendimiento/ Biomasa total**

<sup>1</sup>Ortiz, E. 2017, Ene. Instrucciones del cultivo del amaranto. [Comunicación oral]. San Fernando, Chile. Liceo agrícola El Carmen.

### **Análisis estadístico**

Se utilizó un Análisis de Varianza (ANDEVA) para un diseño en bloques completamente aleatorizado con las repeticiones anidadas en los ambientes a un nivel de significancia del 5%, con el cual se pudo identificar la magnitud y la significancia que es atribuible a cada fuente de variación, ya sea el genotipo, el ambiente o la combinación de estos. Antes de realizar el ANDEVA se comprobó la homogeneidad de varianza y normalidad de los errores de las variables medidas.

**Análisis de conglomerados.** Se hizo este análisis para agrupar los genotipos (Uriel y Aldás, 2002) según las variables altura de planta, largo de panoja, inicio de emisión de panoja, floración y madurez fisiológica.

**Análisis de estabilidad.** Se realizó una regresión lineal entre el rendimiento de cada genotipo, y el rendimiento promedio de todos los genotipos en cada ambiente (Índice Ambiental), donde la pendiente de la regresión lineal corresponde a la estabilidad de los genotipos en los ambientes evaluados. Una pendiente de la regresión ( $b$ )  $<$  a 1, se considera un genotipo estable y  $>$  a 1 se considera inestable (Finlay and Wilkinson, 1963; Eberhart and Russell, 1966).

**Análisis de componentes principales (ACP).** Para explicar las diferencias entre los genotipos, respecto a todas las variables en estudio, se realizó un análisis de componentes principales. Este consiste en construir variables no observables, llamadas componentes, a partir de las variables medidas. Estas nuevas variables generadas, ahora llamadas componentes principales, se obtienen por combinaciones lineales de cada variable original, las que se representan en un Biplot (Balzarini *et al.*, 2005). Se realizó el análisis de dos Biplot, uno respecto de los genotipos en torno a las variables medidas, y otro respecto de los ambientes y las variables evaluadas.

**Modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI).** Para observar la estabilidad de los genotipos y definir qué ambiente y genotipos son los que provocan la interacción, se realizó un análisis AMMI que corresponde a una combinación de ANDEVA y componentes principales aplicados a la interacción GxA. La ecuación de este modelo, se expresa matemáticamente de la siguiente manera y representa la respuesta de un genotipo en un ambiente determinado (Crossa *et al.*, 1995).

$$y_{ij} = \mu + G_i + A_j + \sum_{n=1}^r \lambda_n \xi_{ni} \eta_{nj} + \rho_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Donde  $y_{ij}$  es el rendimiento promedio del genotipo  $i$  en el ambiente  $j$ ,  $\mu$  es el rendimiento promedio de todos los genotipos,  $G_i$  es el efecto del genotipo  $i$ ,  $A_j$  es el efecto del ambiente  $j$ ,  $\sum_{n=1}^r \lambda_n \xi_{ni} \eta_{nj}$  es la sumatoria de términos multiplicativos que modelan la interacción GxA, compuesta por el parámetro de la interacción del  $j$ -ésimo ambiente, denotado por  $\eta_{nj}$ , del  $i$ -ésimo genotipo para la misma componente, denotado por  $\xi_{ni}$  y el autovalor (medida de variación asociado al eje y denotado por  $\lambda_n$ ). El parámetro  $\rho_{ij}$  representa la porción del  $ij$ -ésimo término de interacción GxA no explicado por el modelo multiplicativo y  $\varepsilon_{ij}$  es el término del error aleatorio.

Para todos los análisis estadísticos se utilizó el software estadístico InfoGen, versión 2011 (Balzarini et al., 2011).

## RESULTADOS

### Características de los ambientes

El ambiente IMSep2017 fue el que generó el mayor largo de ciclo de desarrollo de las plantas, observándose una exposición a una menor temperatura media y mayor radiación solar acumulada en comparación a los demás ambientes, los que a su vez fueron similares en cuanto a las variables: largo de ciclo, duración del día, temperatura media y radiación solar (Cuadro 3).

Cuadro 3. Características de los diferentes ambientes en términos de largo de ciclo de los genotipos, duración del día, temperatura media y radiación solar.

Ambiente	Largo de ciclo <sup>1</sup> (días)	Duración del día <sup>2</sup> (horas)	Temperatura media <sup>1</sup> (°C)	Radiación solar <sup>1</sup> (MJ m <sup>-2</sup> )
IMSep2017	164	13,60	18,12	3.955
IMDic2017	101	13,27	19,13	2.374
SFDic2017	107	13,21	20,67	2.546
SFEne2018	113	12,41	19,06	2.260

<sup>1</sup> Promedio de ciclo de los genotipos, desde emergencia a madurez fisiológica.

<sup>2</sup> Promedio de ciclo de los genotipos, desde emergencia a inicio de emisión de panoja.

Pese a que San Fernando tiene una mayor profundidad de suelo (100 cm), versus 60 cm en Isla de Maipo, la humedad aprovechable es mayor en Isla de Maipo que en San Fernando, 127,65 y 108,3 mm, respectivamente (Cuadro 4).

Cuadro 4. Contenido de agua en los suelos de San Fernando e Isla de Maipo. Capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y humedad aprovechable (HA).

Localidad	Profundidad (cm)	CC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	PMP	HA (mm)
San Fernando	0 - 15	30,5	19,4	16,65
	15 - 30	34,1	23,4	16,05
	30 - 45	34,4	23,6	16,20
	45 -100	30,6	19,8	59,40
Isla de Maipo	0 - 15	25,6	14,2	17,10
	15 - 30	29,6	15,5	21,15
	30 - 60	45,2	15,4	89,40

### Rendimiento y variables medidas en los ambientes

Los ambientes en los cuales fueron probados los genotipos presentaron rendimientos promedio que fluctuaron entre los 1.869 y 3.385 kg ha<sup>-1</sup> (Cuadro 5). Los ambientes de fechas de siembra más temprana, de cada localidad (IMSep2017 y SFDic2017), tuvieron la mayor producción de biomasa aérea, mientras que las dos siembras de San Fernando tuvieron el mayor índice de cosecha, por lo que el máximo rendimiento se observó en la primera fecha de siembra de San Fernando (SFDic2017) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Promedio de las variables medidas en cada ambiente.

Ambiente	Biomasa aérea	Rendimiento	Índice de cosecha	Altura de plantas	Largo de panojas	Peso de 1.000 granos	Granos m <sup>-2</sup>
	(kg ha <sup>-1</sup> )			(m)		(g)	(n°)
IMSep2017	11.599a	1.869b	0,18b	2,26a	0,47b	0,76b	244.929b
IMDic2017	9.494b	1.915b	0,20b	2,12a	0,43c	0,81a	235.183b
SFDic2017	13.348a	3.385a	0,26a	2,14a	0,64a	0,83a	406.338a
SFEne2018	9.342b	2.315b	0,25a	2,16a	0,63a	0,82a	282.826b

Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas con un p-valor  $\leq 0,05$ , con la prueba DGC.

### Rendimiento y variables medidas por genotipo y especie

Al evaluar el comportamiento entre las especies, se observó que *A. cruentus* tuvo un mayor rendimiento que *A. hypochondriacus*, así como también un mayor índice de cosecha y número de granos m<sup>-2</sup>, menor biomasa aérea y menor altura de plantas (Cuadro 6). El rendimiento medio de los genotipos osciló entre 2.029 y 2.716 kg ha<sup>-1</sup>, los mayores rendimientos se observaron en los genotipos *A. cruentus*: “CB-01” y “Amaranteca” y el genotipo “Revanca” de *A. hypochondriacus*. El genotipo “Revanca” a pesar de ser de la especie *A. hypochondriacus* tiene un comportamiento similar a los genotipos de *A. cruentus* respecto a su biomasa aérea, rendimiento, índice de cosecha y largo de panojas (Cuadro 6).

Cuadro 6. Promedio de las variables medidas según cada genotipo.

Genotipo	Biomasa aérea	Rendimiento	Índice de cosecha	Peso de 1.000 granos	Número de granos	Altura de plantas	Largo de panojas
	(kg ha <sup>-1</sup> )			(g)	(m <sup>-2</sup> )		(m)
Amaranteca*	9.948b	2.618a	0,26a	0,81b	321.726a	1,99b	0,50b
Benito*	10.312b	2.397b	0,23b	0,83b	288.480a	2,28a	0,58a
CB-01*	9.966b	2.717a	0,27a	0,81b	331.591a	1,98b	0,50b
Areli**	11.046a	2.196b	0,20c	0,80b	270.989b	2,32a	0,59a
Diego**	10.666b	2.029b	0,18c	0,80b	247.245b	2,29a	0,55a
Nutrisol**	13.223a	2.206b	0,18c	0,72c	306.855a	2,36a	0,58a
PQ2**	12.739a	2.313b	0,19c	0,82b	280.188b	2,26a	0,56a
Revancha**	9.668b	2.494a	0,27a	0,85a	291.476b	1,88c	0,48b
<i>A. cruentus</i>	10.075B	2.577A	0,25A	0,82A	313.932A	2,08B	0,53A
<i>A. hypochondriacus</i>	11.468A	2.248B	0,20B	0,80A	279.351B	2,22A	0,55A

Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas con un p-valor  $\leq 0,05$ , con la prueba DGC. Letras mayúsculas en sentido vertical indican diferencias significativas con un p-valor  $\leq 0,05$ , con la prueba de contrastes.

\* Genotipos *A. cruentus*. \*\* Genotipos *A. hypochondriacus*.

En cuanto a fenología, se apreció que en la fecha más temprana, realizada en el mes de septiembre en Isla de Maipo (IMSep2017), hubo una diferencia marcada del largo de ciclo entre las especies de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus*, que alcanzó los 32 días de diferencia en el estado de floración. En la siguiente fecha de siembra realizada en diciembre, tanto en Isla de Maipo (IMDic2017) como San Fernando (SFDic2017), la diferencia en fenología entre las especies de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* disminuyó, observándose a floración una diferencia de sólo 10 días. Finalmente en la fecha de siembra más tardía, realizada en el mes de enero en San Fernando (SFEne2018), la diferencia entre las especies fue mínima, observándose a floración una diferencia de sólo 2 días. Dentro de los genotipos de *A. hypochondriacus*, “Nutrisol” destaca como el genotipo de mayor largo de ciclo, mientras que “Revancha” destaca por ser el de ciclo más corto, similar al de los genotipos de *A. cruentus* (Cuadro 7).

Cuadro 7. Fenología de los genotipos de Amaranto en los ambientes de Isla de Maipo y San Fernando.

Genotipo	IMSep2017			IMDic2017			SFDic2017			SFEne2018		
	IEP	F	MF	IEP	F	MF	IEP	F	MF	IEP	F	MF
	(DDE)											
Amaranteca	99	110	148	51	65	92	40	60	96	42	53	113
Benito	97	108	144	42	65	92	44	57	98	42	53	113
CB-01	103	108	159	55	68	92	44	62	98	42	53	113
Areli	108	138	169	66	81	118	48	76	112	42	53	113
Diego	110	128	159	59	68	103	47	65	112	48	53	113
Nutrisol	127	159	189	70	87	117	65	71	136	48	62	113
PQ2	114	135	169	64	79	103	49	76	107	42	53	113
Revancha	110	118	166	54	65	94	40	61	96	48	53	113
<i>A. cruentus</i>	100	109	150	49	66	92	43	60	97	42	53	113
<i>A. hypochondriacus</i>	114	141	172	63	76	107	50	70	113	46	55	113

IEP: Emisión de panoja. F: Floración. MF: Madurez fisiológica. DDE: días desde emergencia.

El análisis de conglomerados se hizo con variables que poseen una alta heredabilidad, las cuales corresponden a los estados de desarrollo: emisión de panoja, floración y madurez fisiológica, así como también altura de plantas y largo de panojas. Se observó una división en dos grupos, uno conformado por Areli, Diego, PQ2 y Nutrisol que corresponden a genotipos de la especie *A. hypochondriacus* los cuales poseen ciclo más largo juntos con una mayor altura y largo de panoja. El segundo grupo corresponde a Amaranteca, Benito, CB-01 y Revancha, dentro de los cuales los primeros tres corresponden a genotipos de *A. cruentus*, mientras que el último corresponde a *A. hypochondriacus*, siendo éstos los que poseen ciclo más corto, menor altura y largo de panojas (Figura 1).

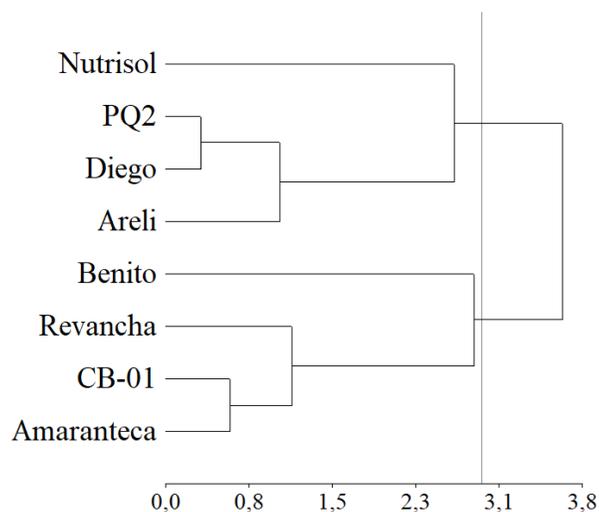


Figura 1. Dendrograma correspondiente al análisis de conglomerado hecho con los ocho genotipos y las variables altura de planta, largo de panoja y la fenología (inicio de emisión de panoja, floración y madurez fisiológica).

Con un análisis combinado de la varianza realizado a los ocho genotipos en los cuatro ambientes estudiados, se determinó que existe interacción GxA significativa para el rendimiento ( $p$ -valor  $<0,05$ ), donde un 21% de la varianza total es explicada por la interacción, mientras que genotipo explica un 9% (Cuadro 8). En el caso de la biomasa aérea la interacción fue significativa, explicando un 32% de la varianza total, mientras que genotipo explicó un 25%. Para el índice de cosecha y peso de 1.000 granos se observa un efecto significativo de la interacción GxA, sin embargo, el mayor porcentaje de la variación fue explicado por el genotipo. En el caso del número de granos  $m^{-2}$ , no hubo interacción significativa. El ambiente tuvo un fuerte efecto sobre rendimiento, número de granos  $m^{-2}$  y largo de panoja (Cuadro 8).

Cuadro 8. Porcentaje de la suma de cuadrados de cada variable medida.

F.V.	Rendimiento	Biomasa aérea	IC	Peso 1.000 granos	Número de granos m <sup>-2</sup>	Altura de planta	Largo de panoja
Ambiente	70 <sup>***</sup>	43 <sup>***</sup>	33 <sup>***</sup>	24 <sup>***</sup>	69 <sup>**</sup>	4 <sup>ns</sup>	62 <sup>***</sup>
Genotipo	9 <sup>**</sup>	25 <sup>***</sup>	39 <sup>***</sup>	45 <sup>***</sup>	10 <sup>**</sup>	46 <sup>***</sup>	13 <sup>***</sup>
G x A	21 <sup>**</sup>	32 <sup>***</sup>	28 <sup>***</sup>	31 <sup>***</sup>	21 <sup>ns</sup>	51 <sup>***</sup>	25 <sup>***</sup>

<sup>ns</sup> Datos no presentan diferencias estadísticamente significativas. <sup>\*\*</sup>Nivel de significancia p-valor < 0,05. <sup>\*\*\*</sup>Nivel de significancia p-valor < 0,01.

### Análisis de la interacción GxA

Dado el fuerte efecto de la interacción GxA sobre el rendimiento, se realizó un análisis de estabilidad de los genotipos. Como resultado de la regresión lineal del rendimiento de cada genotipo sobre el índice ambiental se obtuvo la pendiente de la regresión ( $b$ ) y el  $R^2$  para cada genotipo (Cuadro 9). Benito, CB-01, Nutrisol, PQ2 y Revancha presentaron pendientes ( $b$ ) menores a 1, evidenciándose así genotipos con rendimientos estables dentro de ambas especies. Por otra parte, los genotipos con pendientes ( $b$ ) mayores fueron: Areli y Diego pertenecientes a la especie *A. hypochondriacus*, ambos genotipos inestables tienen un rendimiento promedio bajo, sin embargo, tienen un alto rendimiento en ambientes de alta oferta ambiental (Cuadro 9; Figura 2).

Los valores de  $R^2$  son mayores al 78%, lo que quiere decir que todas las regresiones explican un alto porcentaje de la variación observada, sin embargo, debido al bajo número de puntos las regresiones de Amaranteca y la especie *A. cruentus*, resultaron no ser significativas (Cuadro 10). Al comparar las especies se observa que *A. cruentus* tiene un rendimiento más estable que *A. hypochondriacus* (Cuadro 9; Figura 3).

Cuadro 9. Valores de rendimiento promedio, coeficiente de regresión ( $b$ ) y  $R^2$  resultante de la regresión lineal de ocho genotipos y su media por especie en cuatro ambientes.

Genotipo	Rendimiento promedio (kg ha <sup>-1</sup> )	$b$	$R^2$
Amaranteca	2.618a	1,04	0,78 <sup>ns</sup>
Benito	2.397b	0,71	0,81*
CB-01	2.717a	0,90	0,88*
Areli	2.196b	1,63	0,99***
Diego	2.029b	1,72	0,92**
Nutrisol	2.206b	0,57	0,82*
PQ2	2.313b	0,86	0,82*
Revancha	2.494a	0,58	0,92**
<i>A. cruentus</i>	2.577A	0,88	0,89 <sup>ns</sup>
<i>A. hypochondriacus</i>	2.248B	1,07	0,97***

<sup>ns</sup> No significativo. \*\* Nivel de significancia p-valor <0,05. \*\*\* Nivel de significancia p-valor < 0,01. Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas con un p-valor  $\leq 0,05$ , con la prueba DGC. Letras mayúsculas en sentido vertical indican diferencias significativas con un p-valor  $\leq 0,05$ , con la prueba de contrastes.

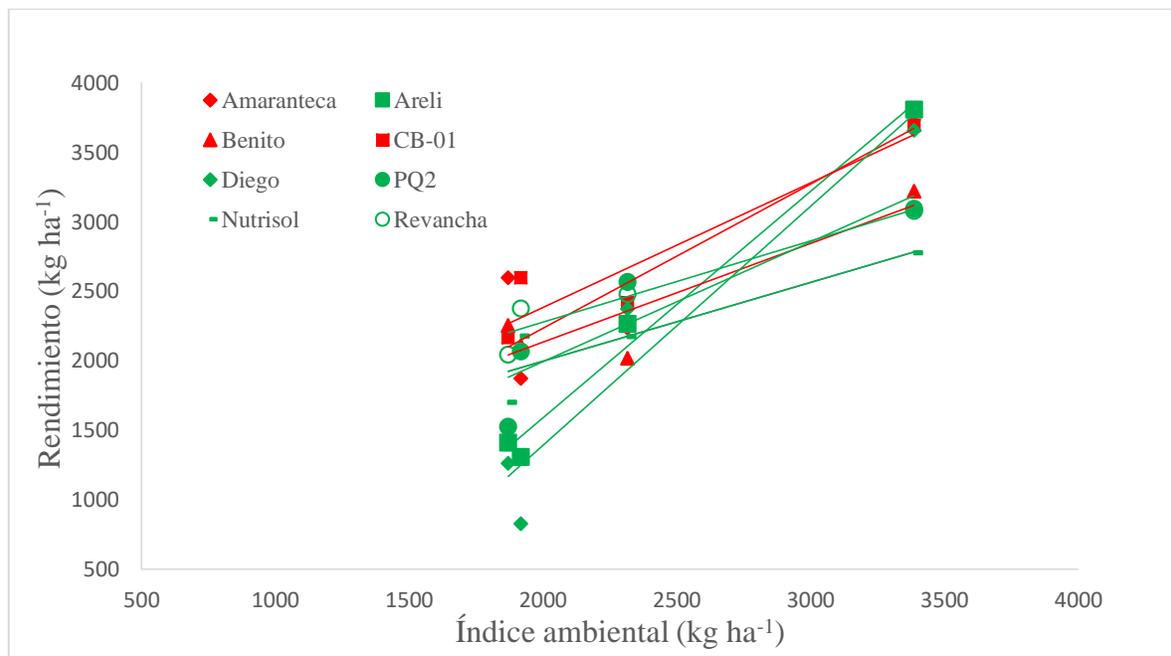


Figura 2. Análisis de estabilidad del rendimiento para ocho genotipos dispuestos en cuatro ambientes.

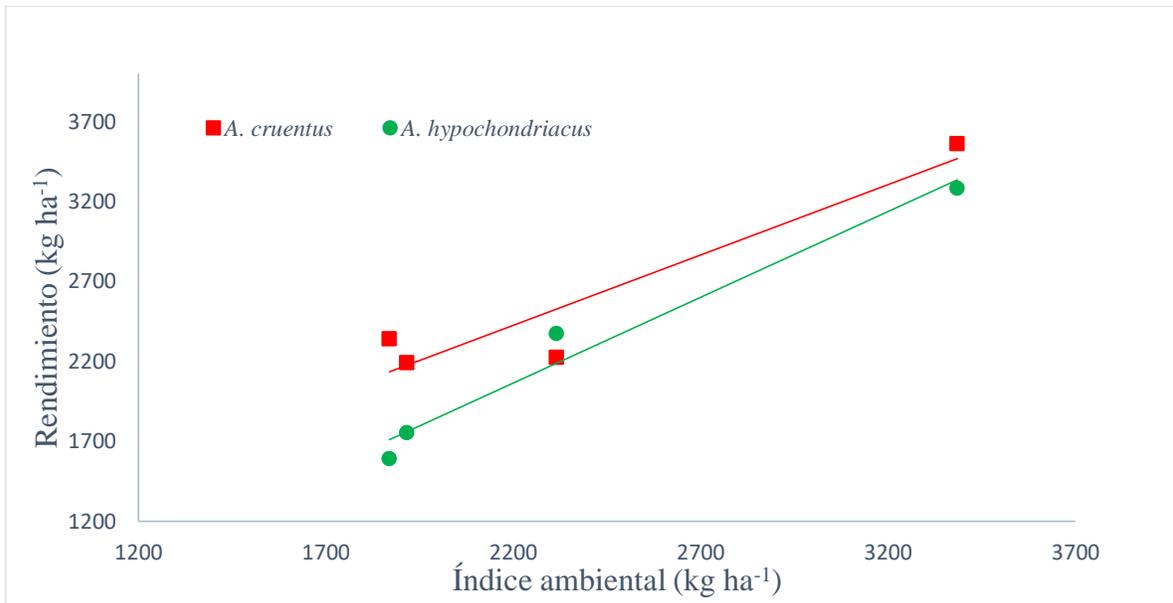


Figura 3. Análisis de estabilidad del rendimiento para las dos especies de amaranto dispuestas en cuatro ambientes.

En el eje “x” del AMMI1 (Figura 4) se ubican a la izquierda los ambientes y genotipos que poseen un menor rendimiento, mientras que a la derecha se encuentran los que poseen un mayor rendimiento. Un ambiente cercano a la línea horizontal que representa el valor 0 en el eje “y” del AMMI1 es un ambiente donde los genotipos son relativamente similares entre sí, mientras que los genotipos que se encuentran más cercanos al valor 0 son más estables. En este sentido los genotipos Areli y Diego fueron los más inestables, coincidiendo con lo encontrado en el Cuadro 10. Mientras que Amaranteca y CB-01 fueron los genotipos más estables y de mayor rendimiento. Los ambientes donde se observó mayor diferencia entre genotipos fueron IMDic2017 y SFDic2017, ambos ambientes con fechas de siembra similares, siendo SFDic2017 el ambiente de mayor rendimiento (Figura 4).

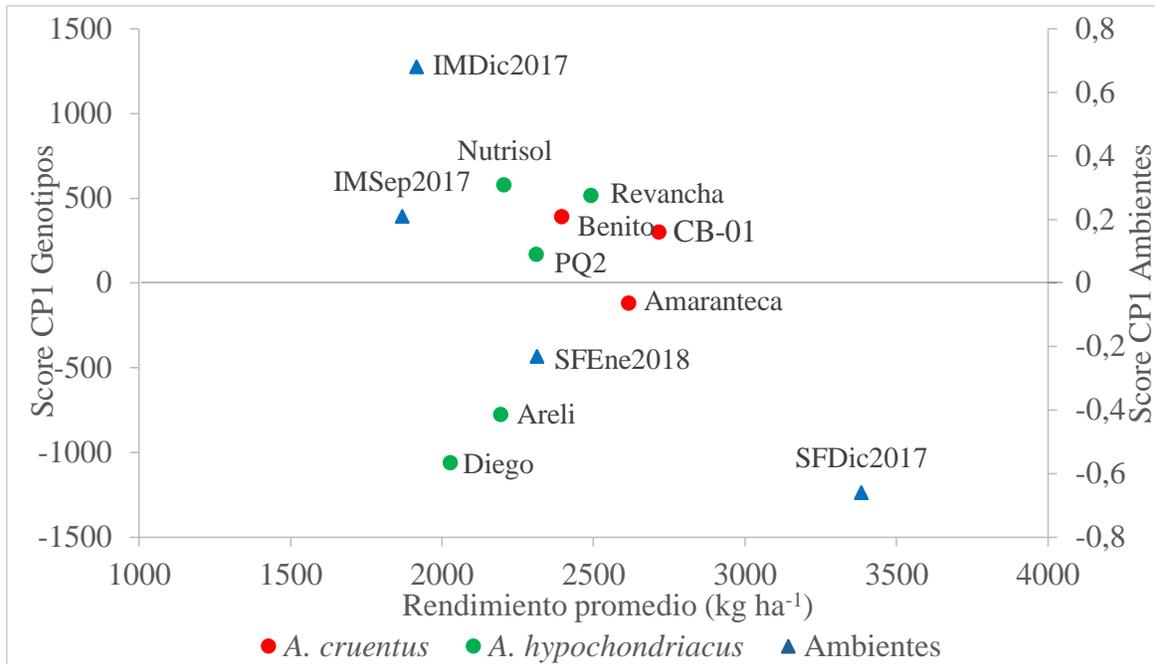


Figura 4. Efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI1) para ocho genotipos en cuatro ambientes.

En el AMMI2 elaborado para la variable rendimiento con ocho genotipos y cuatro ambientes (Figura 5), la primera componente principal (CP1) representa un 71,2% de la variación total explicada por el modelo, mientras que la segunda componente principal (CP2) explica un 24,4% de la variación total explicada, por lo tanto, el biplot representa un 95,6% de la variación total explicada por el modelo. Los genotipos que provocan la interacción son Areli y Diego por tener una mayor proyección en el CP1. Por otra parte, los ambientes SFDic2017 e IMDic2017 son los que explican la mayor proporción de la interacción, siendo ambientes con gran variabilidad dentro de ellos, entre los cuales SFDic2017 es el de mayor rendimiento.

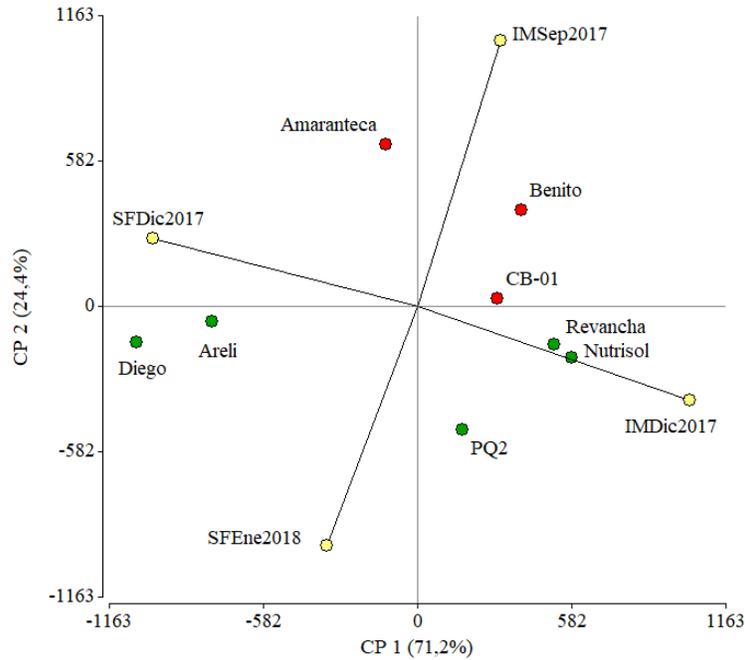


Figura 5. AMMI2 para el rendimiento de ocho genotipos, tres de *A. cruentus* (puntos rojos) y cinco de *A. hypochondriacus* (puntos verdes), dispuestos en cuatro ambientes (vectores con puntos amarillos).

### Relación entre el rendimiento, sus componentes y las variables medidas

Se construyó un gráfico (biplot) correspondiente al análisis de componentes principales (ACP) con ocho genotipos y las variables medidas en cuatro ambientes, más la fenología (inicio de emisión de panoja, floración y madurez fisiológica). El CP1 y CP2 explican un 70,2% y 17,6% respectivamente, por lo tanto, este biplot contiene un 87,8% de la variación total explicada por el modelo.

El rendimiento (Rend) tiene una correlación alta y positiva con el número de granos  $m^{-2}$  ( $N^{\circ}Gm^{-2}$ ) y con el índice de cosecha (IC). A su vez el rendimiento está correlacionado fuerte y negativamente con altura de planta ( $r = -0,82$ ,  $p\text{-valor} = 0,0134$ ) y largo de panojas ( $r = -0,73$ ,  $p\text{-valor} = 0,0388$ ). El rendimiento no está correlacionado con biomasa aérea (BM), fenología del cultivo (inicio de emisión de panoja (IEP), inicio de floración (F), madurez fisiológica (MF)), ni peso de 1.000 granos (P1000). Altura de planta y largo de panoja están fuerte y positivamente correlacionados entre sí ( $r = 0,97$ ,  $p\text{-valor} < 0,0001$ ). Biomasa está positiva y altamente correlacionada con; inicio de emisión de panoja ( $r = 0,74$ ,  $p\text{-valor} = 0,0354$ ), inicio de floración ( $r = 0,86$ ,  $p\text{-valor} = 0,0067$ ) y madurez fisiológica ( $r = 0,80$ ,  $p\text{-valor} = 0,0164$ , Figura 6).

Los genotipos Amaranteca, CB-01 y Revancha se ubican a la derecha del gráfico con tendencia a un mayor rendimiento, índice de cosecha y número de granos  $m^{-2}$ . Benito se ubica junto a un mayor peso de 1.000 granos. Los genotipos con mayor altura de planta y largo de panoja son PQ2, Areli y Diego, pertenecientes a la especie *A. hypochondriacus*. Por último, el genotipo con mayor biomasa y ciclo más largo es Nutrisol (Figura 6).

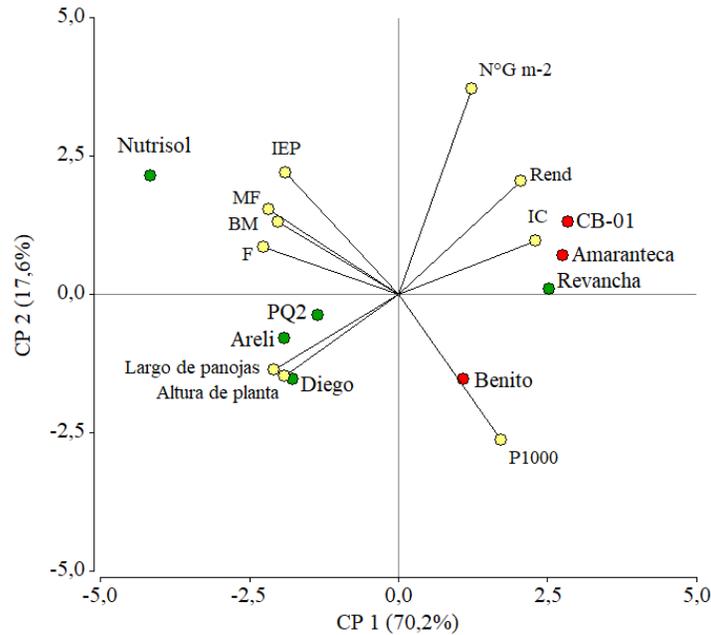


Figura 6. Análisis de componentes principales (ACP) del comportamiento de los ocho genotipos (tres *A. cruentus* con puntos de color rojo y cinco *A. hypochondriacus* con puntos de color verde) respecto de las variables medidas (vectores con punto amarillo) en los cuatro ambientes estudiados. IEP: Inicio de emisión de panoja. F: Inicio de floración. MF: Madurez fisiológica. IC: Índice de cosecha. N°Gm-2: Número de granos  $m^{-2}$ . P1000: Peso de 1.000 granos. BM: Biomasa. Rend: Rendimiento.

### Efecto del largo de día sobre la fenología

Para poder analizar el efecto del largo de día sobre la fenología se usaron los mismos grupos de genotipos, obtenidos del análisis de conglomerados (Figura 1), los que fueron obtenidos según las características fenológicas, de altura y largo de panoja de los genotipos estudiados (Cuadro 11).

En la siembra más temprana (IMSep2017) se observó que los genotipos comenzaron las etapas reproductivas después que comenzó a disminuir el fotoperíodo, observándose una gran diferencia entre ambos grupos, esta diferencia fue menor al disminuir los fotoperíodos (ambientes IMDic2017 y SFDic2017), hasta prácticamente desaparecer con un fotoperíodo

de 12,5 horas en el ambiente SFene2018, donde ambos grupos poseen una fenología similar (Cuadro 12; Figura 7).

En el ambiente SFene2018, en comparación a las fechas de siembra más temprana, el ciclo del Grupo 2 fue más corto y el del Grupo 1 se vio levemente extendido (Figura 7; Figura 8; Figura 9; Figura 10;). En general el Grupo 2 comenzó IEP con largos de día inferiores a 13,9 horas, mientras que el Grupo 1 comenzó IEP con largos de día de hasta 14,2 horas, mientras que la floración se inició con largos de día de 13 y 14 horas respectivamente (Cuadro 11).

Cuadro 10. Grupos de genotipos según el análisis de conglomerados.

Grupo	Genotipos
1	Amaranteca, Benito, CB-01, Revancha
2	Areli, Diego, PQ2, Nutrisol

Cuadro 11. Fotoperiodos al momento de IEP y F, para los grupos 1 y 2.

	Grupo 1		Grupo 2	
	IEP	F	IEP	F
IMSep2017	14,2	14,0	13,9	13,0
IMDic2017	13,4	13,0	13,0	12,4
SFDic2017	13,7	13,2	13,4	12,8
SFene2018	12,9	12,5	12,8	12,5

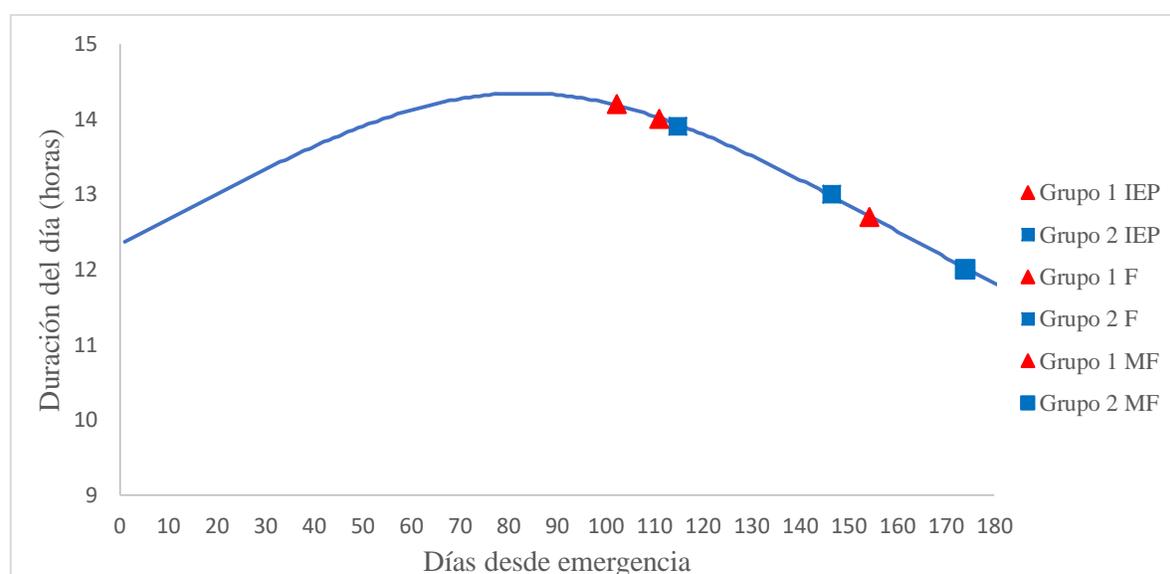


Figura 7. Efecto del largo de día sobre la fenología de los dos grupos de genotipos en el ambiente IMSep2017.

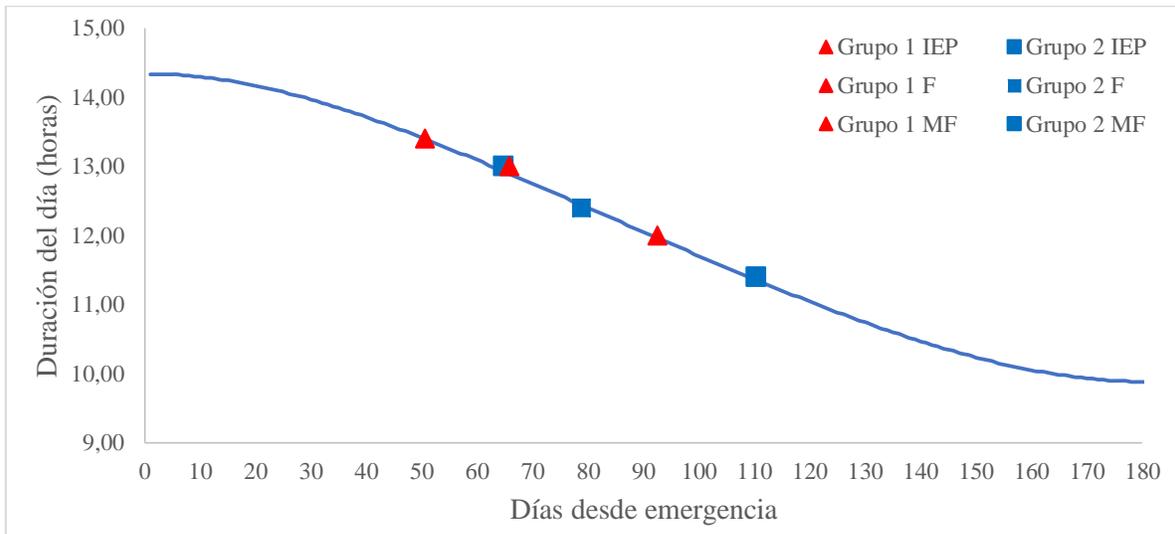


Figura 8. Efecto del largo de día sobre la fenología de los dos grupos en el ambiente IMDic2017.

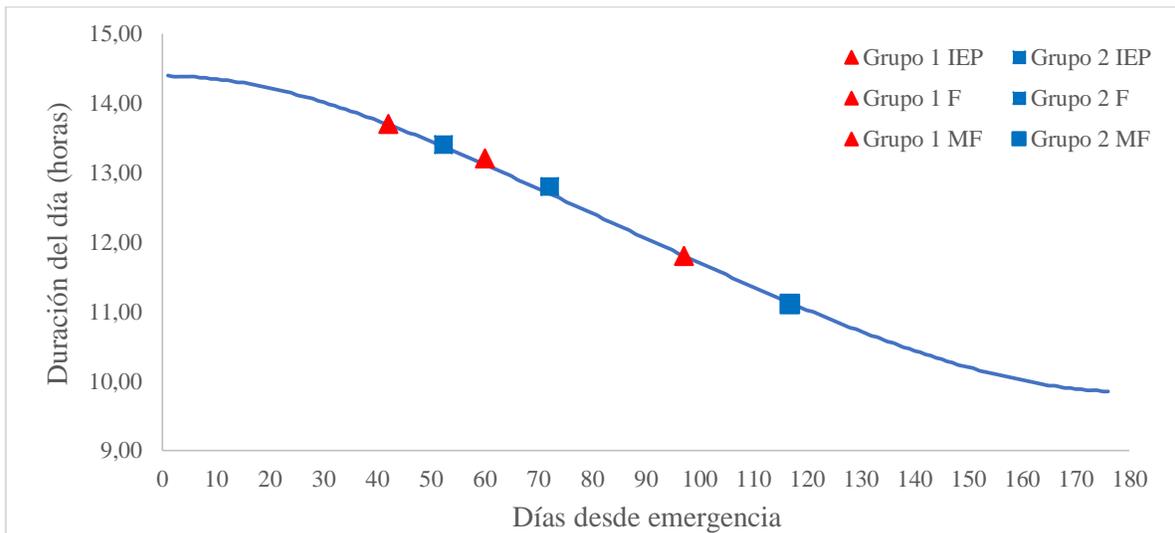


Figura 9. Efecto del largo de día sobre la fenología de los dos grupos en el ambiente SFDic2017.

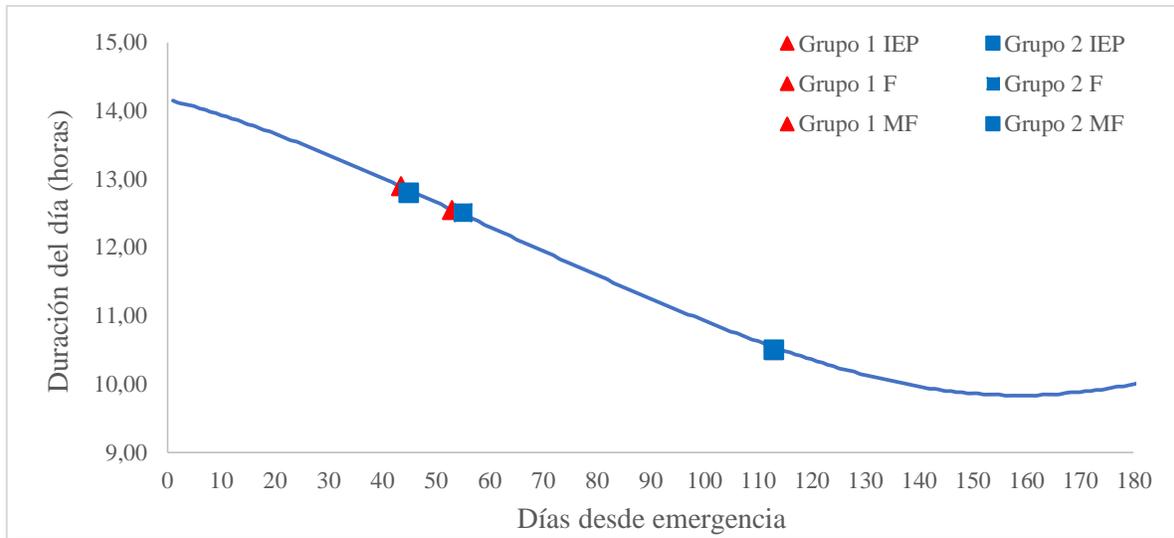


Figura 10. Efecto del largo de día sobre la fenología de los dos grupos en el ambiente SFene2018.

## DISCUSIÓN

La fecha de siembra más temprana provocó una mayor acumulación de biomasa y mayor altura de plantas (Cuadro 6) tal como ha sido descrito por Troiani *et al.* (2004). Espitia (1986) encontró que una mayor altura y biomasa se correlaciona positivamente con el rendimiento de granos, situación contraria a la observada en esta tesis, donde los resultados obtenidos muestran una correlación negativa y significativa entre biomasa e índice de cosecha, como también de altura de plantas con rendimiento e índice de cosecha (Anexo 3; Anexo 4), esto se debe presumiblemente a que al haber una mayor biomasa aumenta el denominador en la ecuación del IC, o bien, porque no habría removilización de asimilados al grano, como si ocurre en otros cultivos (Rawson and Hofstra, 1969; Yang *et al.* 2002). García *et al.* (2010) indicaron que los genotipos sensibles a fotoperíodo, que no se cultivan en una fecha adecuada, al final del ciclo producen una alta biomasa y bajo rendimiento. Característica observada en los genotipos *A. hypochondriacus* (excepto Revancha) en el ambiente IMSep2017 (Anexo 1; Anexo 2), lo que indicaría que estos genotipos tienen un requerimiento de fotoperíodo que se cumple tardíamente en este ambiente. Por otra parte, se observó que los genotipos de *A. hypochondriacus*, a excepción de Revancha, poseen en general una mayor producción de biomasa y altura de plantas que *A. cruentus*.

Los genotipos más inestables son Diego y Areli (Figura 2 y Figura 4), responsables de la interacción, los cuales poseen adaptación específica, donde en ciertos ambientes su rendimiento supera a los demás genotipos, sin embargo, son plantas muy altas (Cuadro 7), lo que dificulta su cosecha. Considerando el análisis de estabilidad están los genotipos más estables que son Benito, Nutrisol y Revancha, siendo este último el de mayor rendimiento promedio. Por último, están los demás genotipos de mayor rendimiento promedio: Amaranteca y CB-01 (Figura 2; Cuadro 10). Por otro lado, se observa que entre los genotipos de alto rendimiento, Amaranteca es el de mayor estabilidad, siendo el AMMI1 el que entrega información más sólida en cuanto a estabilidad, debido a que analiza los efectos de la interacción con mayor precisión (Figura 4).

CB-01 es un genotipo que posee una alta variabilidad fenotípica dentro de su población y además un alto rendimiento. En este sentido, Ramírez *et al.* (2010) mencionan que la homogeneidad dentro de una población no implica necesariamente un mayor rendimiento, donde en ciertos casos una mayor variabilidad presenta una ventaja para su adaptación.

Cabe destacar que el rendimiento se asoció principalmente a un mayor número de granos  $m^{-2}$  ( $r= 0,86$ ;  $p\text{-valor}= 0,0064$ ) (Figura 6; Anexo 3; Anexo 4). Lo que indicaría que un mayor rendimiento obtenido por los genotipos se debió a una mayor adaptación a los ambientes en

que fueron probados, debido a que la floración coincidió con condiciones ambientales favorables para cada genotipo (De Vita *et al.*, 2010).

Además, se observó que los genotipos de ciclo más corto tienen una menor tendedura, producto de una menor acumulación de biomasa (Cuadro 8).

En general, *A. cruentus* tiene un mayor rendimiento de granos que *A. hypochondriacus*, este mismo resultado describieron Alvarado *et al.* (2004) y García *et al.* (2009) indicando que esto ocurre en ambientes con temperaturas medias máximas superiores a 27 °C, lo cual coincide con las temperaturas registradas en los cuatro ambientes estudiados (Cuadro 3).

Dentro de la especie de *A. hypochondriacus*, el genotipo Revancha destaca debido a que tiene un comportamiento muy similar al de los genotipos de *A. cruentus*, especialmente en fenología y en las variables medidas (biomasa, rendimiento, IC, altura de plantas, largo de panojas). Esta similitud indica que los requerimientos de Revancha para iniciar su fase reproductiva son los mismos de *A. cruentus*. Nieto (1989) y Das (2016) describieron que los requerimientos para que los genotipos de amaranto inicien su fase reproductiva son la temperatura y fotoperíodo, siendo este último el más variable dentro de la especie, ya que tanto *A. cruentus* como *A. hypochondriacus* se les atribuye sensibilidad tanto a día corto como a día neutro (NRC, 1984; Nieto, 1986; Mbwambo, 2013; Casini y La Rocca, 2014).

Descartando el ambiente de siembra más temprana (IMSep2017), debido a que tuvo una temperatura media más baja y un fotoperíodo más largo, que provocó un mayor tiempo para el inicio de las etapas reproductivas (Nieto, 1989; Das, 2016), *A. cruentus* inicia su floración, en promedio, entre 53 a 66 días mientras que *A. hypochondriacus* demora entre 55 y 76 días (Figura 8; Figura 9; Figura 10), siendo menor en la fecha más tardía donde el fotoperíodo es más corto (Figura 10). Por lo que, en ambientes con fotoperíodos entre 12,4 y 14,2 horas, los genotipos *A. hypochondriacus* utilizados en este ensayo, son sensibles a fotoperíodo de día corto, mientras que los genotipos estudiados de *A. cruentus* no tiene sensibilidad a fotoperíodo.

De acuerdo a las características de los genotipos; Amaranteca, Benito, CB-01 y Revancha tienen en común el largo de ciclo (Cuadro 7; Cuadro 11). Los genotipos Areli, Diego, PQ2 y Nutrisol son parecidos en altura y biomasa (Cuadro 7; Cuadro 11).

Al comprobarse la existencia de interacción GxA, es de suma importancia considerarla al momento de seleccionar un genotipo para el cultivo del amaranto en la Zona Central de Chile. Como también es importante continuar estudiando las especies de amaranto para así comprender adecuadamente su comportamiento.

## CONCLUSIÓN

Los genotipos con mayor rendimiento, por ende, con mayor adaptación a la zona central de Chile son los genotipos Amaranteca, CB-01 y Revancha, los primeros dos pertenecientes a la especie *A. cruentus* y el último a *A. hypochondriacus*, estos genotipos destacan además por poseer un mayor IC, menor largo de ciclo de desarrollo y menor altura. Por otro lado, los genotipos *A. hypochondriacus*: Diego y Areli tienen adaptación específica a ambientes de mayor rendimiento, siendo ésta la razón por la que provocan la interacción.

Los genotipos de *A. cruentus* y Revancha tienen ciclo de desarrollo más corto que los demás genotipos de *A. hypochondriacus* debido a que éstos últimos, en los ambientes evaluados, son sensibles a fotoperíodo de día corto, además poseen mayor biomasa y altura de plantas.

*A. cruentus* posee una mayor adaptación, sin embargo, dentro de *A. hypochondriacus* Revancha posee un alto rendimiento y estabilidad.

Dentro de *A. hypochondriacus* se observa variabilidad donde también destacan Diego y Areli por su adaptación específica.

**LITERATURA CITADA**

Agromet. 2018. [En línea]. [s.l.]: INIA. Recuperado en: <www.agromet.inia.cl> . Consultado el: 13 de noviembre de 2018.

Balzarini, M.; C. Bruno y A. Arroyo. 2005. Analisis de Ensayos Agrícolas Multiambientales. Ejemplos en Info-gen. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba. 153p.

Barrales, J., E. Barrales y E. Barrales. 2010. AMARANTO: Recomendaciones para su producción. Fundación Produce Tlaxcala A. C. Editorial Plaza y Valdes. Tlaxcala, México. 166p.

Casini, P. and La Rocca F. 2014. Amaranthus cruentus L. is suitable for cultivation in Central Italy: field evaluation and response to plant densities. *Italian Journal of Agronomy*, 9(602): 166-175.

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 1996<sup>a</sup>. Descripciones de suelos, materiales y símbolos: Estudio Agrológico Región Metropolitana. Publicación CIREN N°115. Santiago, Chile. 431 p.

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 1996<sup>b</sup>. Descripciones de suelos, materiales y símbolos: Estudio Agrológico VI Región. Publicación CIREN N°114. Santiago, Chile. 484 p.

Corke, H. and Y. Cai. 2016. The legums and pseudocereals. Amaranth: Overview. Hubei University of Technology, Wuhan, China; University of Hong Kong, Hong Kong, China. 10p.

Crossa, J.; P. Cornelius; K. Sayre and I. Ortiz. 1995. A shifted multiplicative model fusion method for grouping environments without cultivar rank change. *Crop Science*, 35(1): 54-62.

Curti, R.; A. de la Vega; A. Andrade; S. Bramardi and H. Bertero. 2014. Multi-environmental evaluation for grain yield and its physiological determinants of quinoa genotypes across Northwest Argentina. *Field Crops Research*, 166: 46-57.

Das, S. 2016. Amaranthus: A promising crop of future. Editorial Springer Nature. Taki, Waest Bengal, India. 213p.

De Vita P.; A. Mastrangelo; L. Matteu; E. Mazzucotelli; N. Virzi; M. Palumbo; M. Lo Storto; F. Rizza and L. Cattivelli. 2010. Genetic improvement effects on yield stability in durum wheat genotypes grown in Italy. *Field Crop Research*, 119: 68-77.

Eberhart, S. and A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 6(1): 36-40.

Espitia, R. 1986. Caracterización y evaluación preliminar de germoplasma de *Amaranthus spp.* Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Chapingo, México.

Espitia, E.; E. Mapes; C. Núñez y D. Escobedo. 2010. Distribución geográfica de las especies cultivadas de *Amaranthus* y de sus parientes silvestres de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(3): 427-437.

Finlay, K. and G. Wilkinson. 1963. The Analysis of adaptation in plant-breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research*, 14(6): 742-754.

García, J.; C. Valdés; E. Olivares; O. Alvarado; G. Alejandro; E. Salazar y H. Medrano. 2009. Rendimiento de grano y calidad del forraje de amaranto (*Amaranthus spp.*) cultivado a diferentes densidades en el noreste de México. *Phyton*, 78(1): 53-60.

García, J.; C. Valdés; G. Alejandro; I. Villanueva y O. Alvarado. 2011. Interacción genotipo x ambiente y análisis de estabilidad en genotipos de amaranto (*Amaranthus spp.*). *Phyton*, 80(2): 167-173.

García, J.; G. Alejandro; C. Valdés y H. Medrano. 2010. El amaranto, investigación agronómica en el norte de México. Primera Edición. Durango, México: Instituto Tecnológico Del Valle de Guadiana. 158p.

Jacobsen S. y S. Sherwood. 2002. Cultivo de granos andinos en Ecuador: Informe sobre quinua, chocho y amaranto. Quito, Ecuador: Abaya-Yala. 89p.

Mbwambo, O. 2013. Morphological characteristics, growth and yield of elite grain and leaf amaranth in Northern Tanzania. Master of Science in Research Methods. Juja, Kenia. Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology 66p.

NRC (National Research Council). Sep, 1984. Amaranth: modern prospects for an ancient crop. National Academy of Sciences. National Academy Press. Washington D.C., United States of America. 83p.

Nieto, C. 1986. Análisis del crecimiento y respuesta al fotoperíodo de seis especies de *Amaranthus*. Tesis Mg. Sc. Turrialba, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 101p.

Nieto, C. 1989. El cultivo de amaranto (*Amaranthus* spp.) una alternativa económica para Ecuador. (Publicación Miscelánea No. 52). INIAP (Instituto Nacional de Investigación agropecuarias. Ecuador: CIID. 25p.

Ramírez, M.; A. Carballo; A. Santacruz; V. Conde; E. Espitia y F. González. 2010. Distinción, homogeneidad y distribución mediante caracterización morfológica en variedades de amaranto. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(3): 335-349.

Rawson, H. and G. Hofstra. 1969. Translocation and Remobilization of 14c Assimilated At Different Stages by Each Leaf of the Wheat Plant. *Australian Journal of Biological Sciences*, 22(2):321-332.

Santibáñez, F. y J. Uribe. 1990. Atlas agroclimático de Chile: Regiones V y Metropolitana. Santiago, Chile: Ministerio de Agricultura, Fondo de Investigación Agropecuaria, Corporación de Fomento de la Producción. 99p.

Santibáñez, F. y J. Uribe. 1993. Atlas agroclimático de Chile: Regiones Sexta, Séptima, Octava y Novena. Santiago, Chile: Ministerio de Agricultura, Fondo de Investigación Agropecuaria, Corporación de Fomento de la Producción. 65p.

Sunrise and sunset. 2018. [En línea]. [s.l.]. Sunrise and sunset. Recuperado en: <[www.sunrise-and-sunset.com](http://www.sunrise-and-sunset.com)>. Consultado el: 15 de marzo de 2019.

Troiani, R.; T. Sánchez; N. Reinaudi and L. de Ferramola. 2004. Optimal sowing dates of three species of grain-bearing amaranth in the semi-arid Argentine Pampa. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2(3): 385-391.

Uriel, E y J. Aldás. 2002. Análisis multivariante aplicado. Primera edición. Madrid: Trompson editors. 523p.

Yang, J.; P. Peng; Z. Zhanga; Z. Wanga; R. Visperas and Q. Zhua. 2002. Grain and Dry Matter Yields and Partitioning of Assimilates in Japonica/Indica Hybrid Rice. *Crop Science*, 42:766-772.

## ANEXOS

Anexo I. Rendimiento promedio de cada genotipo en los ambientes de Isla de Maipo y San Fernando.

Genotipos	IMSep2017	IMDic2017	SFDic2017	SFEne2018
	Rendimiento	Rendimiento	Rendimiento	Rendimiento
(kg ha <sup>-1</sup> )				
Amaranteca	2.596a	1.870a	3.772a	2.235a
Benito	2.252a	2.106a	3.216a	2.015a
CB-01	2.166a	2.594a	3.689a	2.418a
Areli	1.410b	1.307a	3.803a	2.263a
Diego	1.262b	828a	3.655a	2.373a
Nutrisol	1.699b	2.178a	2.776a	2.173a
PQ2	1.526b	2.067a	3.093a	2.565a
Revancha	2.043a	2.376a	3.077a	2.479a

Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas con un p-valor  $\leq 0,05$ , con la prueba DGC.

Anexo II. Biomasa promedio de cada genotipo en los ambientes de Isla de Maipo y San Fernando.

Genotipos	IMSep2017	IMDic2017	SFDic2017	SFEne2018
	Biomasa	Biomasa	Biomasa	Biomasa
(kg ha <sup>-1</sup> )				
Amaranteca	10.056b	8.079a	12.788b	8.867a
Benito	9.234b	10.353a	12.066b	9.594a
CB-01	7.775b	11.239a	11.072b	9.779a
Areli	11.647b	8.027a	15.419a	9.091a
Diego	10.064b	8.408a	14.797a	9.394a
Nutrisol	17.431a	10.624a	14.654a	10.183a
PQ2	15.053a	10.679a	15.212a	10.011a
Revancha	11.532b	8.542a	10.773b	7.823a

Letras minúsculas distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas con un p-valor  $\leq 0,05$ , con la prueba DGC.

Anexo III. Matriz de correlación/coeficientes del análisis de componentes principales ocho genotipos en cuatro ambientes.

	Largo de panojas	P1000	N°G m-2	BM	Rend	Altura de planta	IEP	F	MF	IC
Largo de panojas	1,00	0,2151	0,2092	0,0914	0,0388	0,0001	0,3820	0,0934	0,1365	0,0117
P1000	-0,49	1,00	0,7783	0,0620	0,3236	0,1395	0,282	0,0364	0,0159	0,1292
N°G m-2	-0,50	-0,12	1,00	0,6950	0,0064	0,1542	0,6852	0,3086	0,4968	0,0790
BM	0,63	-0,68	-0,17	1,00	0,1701	0,0502	0,0354	0,0067	0,0164	0,0139
Rend	-0,73	0,40	0,86	-0,54	1,00	0,0134	0,1446	0,0256	0,0603	0,0015
Altura de planta	0,97	-0,57	-0,55	0,71	-0,82	1,00	0,2665	0,0427	0,0837	0,0014
IEP	0,36	-0,76	-0,17	0,74	-0,56	0,45	1,00	0,0025	0,0002	0,0762
F	0,63	-0,74	-0,41	0,86	-0,77	0,72	0,90	1,00	0,0001	0,0028
MF	0,57	-0,81	-0,28	0,80	-0,69	0,65	0,96	0,97	1,00	0,0178
IC	-0,83	0,58	0,65	-0,81	0,91	-0,92	-0,66	-0,89	-0,80	1,00

Anexo IV. Autovalores del ACP hecho con los ocho genotipos en cuatro ambientes respecto de todas las variables.

	Lambda	Valor	Proporción	Proporción Acumulada
1		7,02	0,70	0,70
2		1,76	0,18	0,88
3		0,76	0,08	0,95
4		0,31	0,03	0,98
5		0,11	0,01	1,00
6		0,03	0,00	1,00
7		0,01	0,00	1,00
8		0,00	0,00	1,00
9		0,00	0,00	1,00
10		0,00	0,00	1,00

Anexo V. Autovectores del ACP hecho con los ocho genotipos en cuatro ambientes respecto de todas las variables.

Variables	e1	e2
Largo de panojas (m)	-0,30	-0,24
P1000	0,27	-0,42
N°G m-2	0,19	0,59
BM	-0,32	0,21
Rend	0,33	0,33
Altura de planta (m)	-0,33	-0,22
IEP	-0,30	0,35
F	-0,36	0,14
MF	-0,35	0,24
IC	0,37	0,15