



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FISIOLOGÍA VEGETAL

ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO Y CALIDAD DE SEMILLAS DE TRES TIPOS DE CHILE (*Capsicum annuum* L.)

MISAEEL JORGE AYALA VILLEGAS

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2012

La presente tesis titulada **“ANÁLISIS DE CRECIMIENTO Y CALIDAD DE SEMILLAS DE TRES TIPOS DE CHILE (*Capsicum annuum* L.)”**, realizada por el alumno Misael Jorge Ayala Villegas, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

RECURSOS GENETICOS Y PRODUCTIVIDAD

FISIOLOGÍA VEGETAL

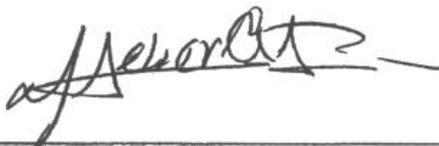
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. OSCAR JAVIER AYALA GARAY

ASESOR:



DR. VÍCTOR HEBER AGUILAR RINCÓN

ASESOR:



DR. TARSICIO CORONA TORRES

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Febrero de 2012

A G R A D E C I M I E N T O S

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para adquirir este grado académico.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por colaborar en mi manutención durante la finalización de este escrito mediante una beca.

Al Colegio de Postgraduados por haberme dado la oportunidad de formarme en sus instalaciones.

Al Dr. Oscar Javier Ayala Garay por contribuir en mi proceso educativo, por confiar y hacer que yo confíe en mi, y por lograr de nuestra relación alumno-profesor una amistad.

Al Dr. Víctor Heber Aguilar Rincón porque me compartió su conocimiento sobre el cultivo de chile y así formó parte fundamental de esta investigación.

Al Dr. Tarsicio Corona Torres por haber sido parte del equipo de este trabajo y haber aportado para el desarrollo del mismo.

Al Dr. José Alfredo Carrillo Salazar y al Ing. Iván Ramírez Ramírez por colaborar en diferentes aspectos durante el desarrollo de esta tesis.

A la Sra. Marisela Valdez por la confianza que depositó en mi y hacer de mi estancia en el colegio una etapa aun más memorable.

A la Sra. Alicia por su apoyo en la realización de múltiples tramites durante mi estancia en el Colegio.

Al personal de laboratorios, Juan y Javier, y al Sr. Toribio del campo experimental por el apoyo para llevar a buen término esta investigación.

DEDICATORIA

A mis padres

Porfirio Ayala

María Luisa Villegas

Hermanos

Cinthia y Charbel

y Abuelos

Miguel y Susana

Por ser mi núcleo, las personas que siempre han estado y estarán conmigo y porque sé que se sienten orgullosos con cada logro que obtengo, lo que para mi representa mi mayor satisfacción.

A mi sobrina Ximena porque ya es mi motivación a continuar por un buen camino; además, con el afán de ser un buen ejemplo para ella.

A todos los miembros de mi familia porque en conjunto son el mejor apoyo que me impulsa a cumplir mis objetivos.

A mis amigos que hacen de mi paso por esta vida un tiempo agradable; con reconocimiento especial a Emmanuel, Deyxi, Gaby, Javier, Salvador, Bethel, Irvin, Víctor y Andrés.

Y a todas aquellas personas que me tiene una consideración especial.

ÍNDICE

LISTADE CUADROS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
RESUMEN.....	iii
SUMMARY	iv
I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Objetivos.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Importancia del Cultivo	4
2.2 La Producción de Chile en México	5
2.3 Exportaciones e Importaciones	5
2.4 Descripción Botánica del Género <i>Capsicum</i>	6
2.5 Taxonomía	7
2.6 Diversidad Genética de <i>Capsicum annuum</i> L.....	8
2.7 Análisis de Crecimiento Vegetal.....	11
2.7.1 Índices de Eficiencia Fisiológica.....	12
2.7.1.1 Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC)	12
2.7.1.2 Tasa Relativa de Crecimiento (TRC)	13
2.7.1.3 Tasa de Asimilación Neta (TAN)	13
2.7.1.4 Índice de Área Foliar (IAF)	13
2.8 Acumulación y Distribución de Biomasa	14
2.9 Desarrollo de las Semillas	15
2.10 Germinación y Latencia.....	19
2.11 Calidad de Semillas.....	21

2.12 Madurez del Fruto y Extracción de Semillas	22
2.13 LITERATURA CITADA.....	25
III. DISTRIBUCIÓN DE BIOMASA Y EFICIENCIA FISIOLÓGICA DURANTE EL DESARROLLO DE TRES TIPOS DE <i>Capsicum annuum</i> L.	31
3.1 INTRODUCCIÓN	31
3.2 MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.2.1 Temperatura del aire	34
3.2.2 Variables de biomasa y área foliar	34
3.2.3 Variables fisiológicas de las hojas	35
3.2.4 Análisis de datos	35
3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
3.3.1 Condiciones ambientales.....	36
3.3.2 Área foliar	37
3.3.3 Acumulación de biomasa.....	38
3.3.3.1 Biomasa de la planta completa	38
3.3.3.2 Biomasa de los órganos de la planta	40
3.3.4 Distribución de la biomasa.....	43
3.3.5 Índices de eficiencia fisiológica y relaciones fuente-demanda	46
3.3.5.1 Tasa absoluta (TAC) y relativa de crecimiento (TRC).....	46
3.3.5.2 TAC y TRC de los órganos individuales	48
3.3.6 Fotosíntesis.....	51
3.4 CONCLUSIONES.....	54
3.5 LITERATURA CITADA.....	55

IV. EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DE SEMILLA DE <i>Capsicum annuum</i> L. EN CINCO ETAPAS DE DESARROLLO	60
4.1 INTRODUCCIÓN	60
4.2 MATERIALES Y MÉTODOS	62
4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
4.3.1 Cinética de la germinación	71
4.4 CONCLUSIONES.....	74
4.5 LITERATURA CITADA.....	75
V. DISCUSIÓN GENERAL Y PERSPECTIVAS.....	79

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Grados de libertad (GL), cuadrados medios y significancia estadística en los análisis de la varianza.....	65
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Chile ancho a) inmaduro y b) maduro.....	10
Figura 2. Chile guajillo a) inmaduro y b) maduro.	10
Figura 3. Chile de árbol a) inmaduro y b) maduro.	11
Figura 4. Temperatura ambiental durante el desarrollo del cultivo de chile.....	36
Figura 5. Cinética de acumulación del área foliar por planta de tres tipos de chile.	37
Figura 6. Cinética de la acumulación de biomasa total por planta de tres tipos de chile.....	39
Figura 7. Cinética de la acumulación de biomasa de las diferentes estructuras de tres tipos de chile.	42
Figura 8. Distribución de biomasa en plantas de tres tipos de chile en cinco fechas durante su desarrollo.	44
Figura 9. Tasa absoluta de crecimiento de plantas de tres tipos de chile.....	46
Figura 10. Tasa relativa de crecimiento en plantas de tres tipos de chile.	47
Figura 11. Tasa absoluta de crecimiento de los órganos de plantas de tres tipos de chile.....	49
Figura 12. Tasa relativa de crecimiento de los órganos de plantas de tres tipos de chile.....	50
Figura 13. Tasa de fotosíntesis neta en la hoja más joven y una hoja con demanda directa en los tipos de chile de árbol, ancho y guajillo en cuatro etapas del ciclo.	52
Figura 14. Evolución de la calidad de semillas de tres tipos de chile cosechadas en cinco etapas de desarrollo.....	66
Figura 15. Calidad de semillas de tres tipos de chile extraídas inmediatamente después de la cosecha y después de 15 días dentro del fruto.	68
Figura 16. Evolución de la calidad de semillas de chile cosechadas en cinco etapas de desarrollo y extraídas inmediatamente después de la cosecha y después de 15 días dentro del fruto	70
Figura 17. Germinación acumulada de semillas de chile de árbol, ancho y guajillo..	72

RESUMEN

El chile es una de las hortalizas más importante a nivel mundial. México es de los países con mayor producción y al ser centro de origen y domesticación de la especie *Capsicum annuum* L. tiene una amplia diversidad de materiales agrupados en tipos. Los estudios referentes al crecimiento y desarrollo de la planta y semilla de chile, son escasos y no son recientes. Aquí, se comparó el crecimiento de la planta de los tipos de árbol, ancho y guajillo y se evaluó la calidad de semillas durante su desarrollo. Se utilizaron semillas provenientes del Programa de Conservación de Germoplasma de Chile del Colegio de Postgraduados. Las plantas crecieron bajo condiciones de invernadero en Texcoco, Edo, de México entre el 25 de marzo y el 12 de noviembre de 2010. El trabajo experimental se dividió en dos partes. En la primera se analizó el crecimiento, encontrándose que los tipos estudiados son muy similares en la forma de distribuir la biomasa. Respecto a la eficiencia fotosintética el chile ancho fue más eficiente pues produjo mayor cantidad de biomasa total con un área foliar menor ($0.16 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$) que el chile de árbol ($0.41 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$). En los tres tipos se notó un efecto antagónico entre el crecimiento de órganos vegetativos y reproductivos Respecto a la calidad de semillas; las variables de peso de 1000 semillas y peso volumétrico alcanzaron un máximo en la etapa de cambio de color de fruto en los tipos ancho y guajillo y hasta la etapa de fruto seco en el chile de árbol. En todas las etapas de desarrollo evaluadas, dejar las semillas 15 días dentro de fruto favoreció el incremento del porcentaje de germinación, que alcanzó hasta 93.4 % en promedio comparada con las semillas extraídas inmediatamente (6.7 %), y el vigor.

Palabras clave: *Capsicum annuum*, análisis de crecimiento, etapa de desarrollo, etapa de extracción, germinación.

SUMMARY

Chilli is one of the most important crops in the world. Mexico is an important producer of this crop; also, it is the center of origin and domestication of the *Capsicum annuum* L. specie which causes a huge diversity of materials. Different studies about growth and seed quality had been done; however, they are not recent. In this research, the plant growth, and seed quality during its development of the three chilli cvs.: “de arbol”, “ancho” y “guajillo” were studied. Seeds from the Chilli Germplasm Conservation Program of the Colegio de Postgraduados were used. The plants were grown under greenhouse conditions in Texcoco, Mexico during the summer of 2010. Results indicated that plants of the three cvs. are similar in how they distributed the biomass. Besides it was found that cv. “ancho” was more efficient in photosynthesis because it produced more biomass than the others with minor leaf area. In addition, an antagonistic effect was noted between growth of vegetative and reproductive organs. Moreover, both, the weight of 1000 seeds and the volumetric weight reached the maximum values when the fruit change color for the cvs. “ancho” and “guajillo”, and when the fruit was completely dry for the cv. “de arbol”. In all stages of development, seeds extracted 15 days after harvest improved the physiological quality of seed; for example, the germination reached 93.4 % compared, compared when seed where extracted immediately (6.7 %).

Key words: *Capsicum annuum* L., growth analysis, development stage, extraction stage, germination.

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

El cultivo de chile (*Capsicum spp.*) inició cuando diferentes culturas antiguas lo consumían y utilizaban en actos religiosos. Su principal uso ha sido la alimentación humana, aunque en los últimos años se le atribuyen propiedades antioxidantes y anticancerígenas que permiten su aplicación en áreas como la cosmetología y la medicina.

El género *Capsicum* pertenece a la familia *Solanaceae* y consiste de al menos 25 especies silvestres y semicultivadas y cinco domesticadas: *C. baccatum*, *C. chinense*, *C. frutescens*, *C. pubescens* y *C. annuum*. La domesticación de *C. annuum* ocurrió en México y América Central en donde se encuentra una amplia diversidad clasificada en tipos de acuerdo a las características del fruto (Pozo, 1981; Smith *et al.*, 1987; Bosland, 1992; Hernández-Verdugo *et al.*, 1999; Aguilar-Rincón *et al.*, 2010) y su distribución es prácticamente en todas las zonas templadas y cálidas del mundo (Nuez *et al.*, 2003).

C. annuum es la especie más conocida y de mayor importancia económica por el volumen de su producción. México, al ser centro de origen de esta especie, se caracteriza por ser uno de los principales países productores y consumidores de ésta, además de que factores como la ubicación geográfica, la diversidad de material vegetal, y la domesticación de la especie favorecen el cultivo, donde además de la innegable presencia en el consumo diario, tiene un impacto social positivo por el valor que aporta a la producción agrícola pues genera ingresos competitivos para los productores y favorece la creación de empleos.

La producción se divide en dos vertientes: producción de chiles secos y de chiles frescos o verdes. Los principales países productores de chiles secos en el mundo son India con más de 1 millón de toneladas anuales; China (244,400 t año⁻¹); Perú (148,023 t año⁻¹); y recientemente países como Tailandia, Pakistán,

Bangladesh y Etiopia con más de 100,000 t año⁻¹ han cobrado importancia. México figura en la onceava posición con una producción media anual de 57,430 t año⁻¹. La producción de chiles verdes está principalmente en manos de China con 13.2 millones de toneladas y México, que solía ser el principal competidor de China con 1.7 millones de toneladas anuales se ha visto desplazado por Turquía que produce 1.8 millones de toneladas (FAO, 2011).

En México, en el año 2009 destacaron los estados de Zacatecas, Chihuahua y Sinaloa como principales productores con más de la mitad del volumen nacional en su conjunto. Sinaloa registró el mayor rendimiento promedio con 40 t ha⁻¹ debido a su alto grado de tecnificación; Chihuahua 20 t ha⁻¹; mientras que Zacatecas, el estado con mayor superficie sembrada tuvo 7 t ha⁻¹. Los principales chiles producidos son jalapeño, ancho y serrano que en el año 2009 aportaron el 60 % del volumen nacional total de chiles verdes (SIAP, 2011).

Existe una gran diversidad de tipos de chile cultivados y silvestres en México, que son sólo aprovechados a nivel regional o local y que están en riesgo de desaparecer por la constante tendencia a la generación y uso de variedades (Laborde y Pozo, 1984; Aguilar-Rincón et al., 2010). Esta diversidad fitogenética es básica para la humanidad porque es parte de la seguridad alimentaria. Por consiguiente, es importante enfocar esfuerzos en su aprovechamiento y conservación.

La mayor cantidad de información sistematizada sobre el cultivo de chile se refiere al manejo agronómico; no obstante, entre otras cosas, es necesario definir aspectos clave como la duración del ciclo, las etapas de desarrollo, la distribución de los fotoasimilados por órganos, el desarrollo de la semilla y el proceso de germinación; pues estos servirán para comprender mejor los procesos fisiológicos que determinan la producción y así fundamentar y mejorar las prácticas de manejo del cultivo: nutrición, riego, podas, estrategias de protección, entre otras (Azofeifa y Moreira, 2004).

La utilización de semillas de calidad constituye el primer aspecto importante para producir un cultivo rentable, y de acuerdo con la fisiología de semillas, existe un momento óptimo de cosecha para obtener una semilla con mejores características físicas y fisiológicas (Wurr y Fellows, 1983; Bino *et al.*, 1998; Doijode, 2001), que en el caso del Chile se ha inferido en diferentes investigaciones sin haberse hecho una recomendación puntual, sobre todo por la amplia diversidad existente dentro de la misma especie.

Además, tener una semilla de calidad cobra importancia en los programas de conservación de germoplasma y mejoramiento genético pues ésta mantiene por más tiempo su potencial físico y fisiológico durante el almacenamiento.

En la presente investigación se estudiaron tres tipos de Chile: ancho y verde que se llegan a utilizar en verde aunque el mercado principal es en seco; y el Chile guajillo que raramente se utiliza en verde siendo en su totalidad utilizado en seco. La información sistematizada sobre el crecimiento, desarrollo y producción de semillas de estos tres tipos de Chile que son un recurso fitogenético importante en nuestro país es escasa. Por lo anterior, en esta investigación se plantearon los siguientes objetivos.

1.1 Objetivos

- Realizar un análisis fisiológico del crecimiento de la planta de los tipos de Chile árbol, ancho y guajillo y generar información que contribuya a mejorar el manejo agronómico del cultivo.
- Evaluar las características de calidad de semillas de los tres tipos de Chile, cosechados en cinco etapas de desarrollo del fruto y verificar la correlación entre el grado de madurez de éste y de la semilla; así como determinar la etapa más apropiada para obtener semillas con la más alta calidad.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia del Cultivo

El cultivo del chile (*Capsicum spp.*) está prácticamente presente en todas las zonas templadas y cálidas del mundo (Nuez *et al.*, 2003). Su utilización data desde tiempos remotos, principalmente como condimento por parte de las diferentes culturas americanas (Long-Solís, 1986). Sin embargo, la utilidad es versátil e incluye usos como colorante de alimentos y cosméticos, planta ornamental (Bosland, 1997) y religiosa, así como antimicrobiano (Cichewicz y Thorpe, 1996), entre otros.

El chile también se relaciona con algunos efectos medicinales, por ejemplo: aumenta el número de calorías quemadas durante la digestión, reduce los niveles de colesterol, es anticoagulante y se asocia con actividades antioxidantes. Tradicionalmente se usa como infusión para el asma, la tos y el resfriado; como analgésico en caso de artritis y como anti inflamatorio; incluso, previene el riesgo de padecer cáncer por ser una fuente de nutrientes esenciales y vitaminas B1, B2, B3, C y provitaminas A, E y P (Howard, 2011).

El chile constituye una fuente importante de nutrimentos ya que en promedio 148 g de chiles contienen 30 calorías; 7 g de carbohidratos; 2 g de fibra dietética; 4 g de azúcar; un gramo de proteína; y proporciona 8 % de la dosis diaria recomendada de vitamina A, 180 % de vitamina C, 2 % de calcio y 2% de hierro (Bosland y Votava, 2000).

Además de la innegable presencia del chile en el consumo diario, éste es importante por el valor que aporta a la producción agrícola de las regiones involucradas, al generar ingresos competitivos para los productores, y la creación de empleos es reflejo de un impacto social positivo que trasciende las fronteras de México (SIAP, 2011).

2.2 La Producción de Chile en México

Del total de variedades producidas, en México existe una concentración de 22 grupos de chiles verdes entre los cuales destacan el jalapeño, el poblano y el serrano; y 12 secos. Los chiles verdes, se producen durante la mayor parte del año realizándose dos cosechas, la siembra del ciclo otoño-invierno que inicia en diciembre y concluye en agosto y la de primavera-verano que abarca de junio a marzo.

Por variedades, la tercera parte de la producción es de chile jalapeño con 31 %; y que junto con serrano (10.9 %), poblano (9.7 %) y morrón (8.1 %) aportaron 59.7 % del volumen nacional total de chiles verdes en el año 2009 (SIAP, 2011).

En el periodo de 2000 a 2009, la superficie cosechada registró una tasa media anual de crecimiento de -0.4 %, pues pasó de 145,647 hectáreas en 2000 a 140,424 en 2009, esta disminución se debió a diversos problemas en la producción (SIAP, 2011).

Entre los años 2000 y 2009, el consumo aparente promedió fue solo de 1.6 millones de toneladas; no obstante, en 2008 y 2009 fue inferior. Esto no significa que la producción haya disminuido sino que la demanda internacional del cultivo mexicano creció considerablemente (SIAP, 2011).

2.3 Exportaciones e Importaciones

De acuerdo a la información del SIAP (2011), desde el año 2000 hasta el 2009, la tasa de crecimiento promedio anual del volumen exportado fue de 14.6 %, mientras que cifras mundiales de comercio de la FAO indican que México es el principal exportador de chile verde y sexto de chile seco al extranjero. El volumen que la nación coloca en el mercado internacional excede 28.8 % al de

Países Bajos, aunque el valor comercial representa la mitad de lo que obtiene este grupo de países. Los principales importadores del producto mexicano son Estados Unidos, Japón, Canadá, Reino Unido y Alemania.

El ingreso al país por concepto de exportaciones fue de 720 millones de dólares en 2009 pues el volumen triplicó al del año 2000. En 2009, el producto nacional fue adquirido por 52 países de los cinco continentes de los cuales el principal importador adquirió el 98.3 %.

Reino Unido, Canadá y Alemania representan en conjunto un punto porcentual de las compras, con volúmenes entre 2,100 y 2,600 toneladas. Los países de centroamérica, Honduras y Guatemala adquieren en conjunto 926 toneladas con un valor de casi un millón de dólares.

El mercado extranjero tiene una marcada preferencia por los productos frescos. La demanda se completa con chiles preparados en vinagre y secos con una total de 16.8 %. Estados Unidos compra a México 98.9 % de chile morrón, 81.2 % de ancho seco y 92.1 % de los preparados.

Entre las variedades de chile que se importan predominan los productos secos con 95.3 %. México adquirió del extranjero entre 2000 y 2009 un promedio de 30 mil toneladas, de las cuales China es el principal proveedor con 26,243 toneladas (62.6 % de las adquisiciones).

2.4 Descripción Botánica del Género *Capsicum*

El chile presenta una raíz pivotante, provista de muchas raíces secundarias largas y fibrosas. Suele profundizar entre 30 y 60 cm y la exploración lateral se extiende hasta 50 cm del eje. El sistema radical representa del 7 al 17 % del peso seco total de la planta adulta, dependiendo del genotipo, las condiciones de cultivo y las relaciones fuente-demanda (Wien, 1999; Nuez *et al.*, 2003)

El tallo es erecto, herbáceo, ramificado y circular a la madurez en la sección media. Puede ser glabro o pubescente y de crecimiento determinado o indeterminado (Valadez, 1993; Nuez *et al.*, 2003).

El número de hojas es controlado por la temperatura y el genotipo, pero generalmente se desarrollan entre 8 y 15 hojas antes de la aparición de la primera flor, y la relación entre el número de hojas y flores es cercano a uno (Rylski, 1986). Las hojas varían en tamaño, forma y color pero la mayoría son simples, enteras y simétricas; además, suelen ser planas, suaves, y pueden o no tener pubescencia (Bradford y Votava, 2000). El número de estomas por hoja se ubica en rango de 120-190 mm⁻² para hojas que crecen bajo sol y de 35-70 mm⁻² para hojas que crecen en sombra (Schoch, 1972).

La flor típica es pentámera, hermafrodita e hipógina y se encuentra usualmente solitaria en las axilas. *C. annuum* inicia la floración con una flor en el primer nudo axilar, después una flor se forma en cada nudo adicional, en progresión geométrica (Bosland y Votava, 2000).

El fruto es una baya constituida por un pericarpio grueso, succulento y un tejido placentario al que se unen las semillas. La pungencia se debe a la presencia de capsaicinoides, cuyo contenido varía desde trazas hasta 0.7 % de la biomasa total del fruto en los tipos más picantes (Nuez *et al.*, 2003). El cambio de coloración se debe a que el contenido de carotenoides aumenta hasta 120 % en el momento de la madurez. El contenido de azúcares también sufre incrementos progresivos hasta la maduración total (Salunkhe, 2003).

2.5 Taxonomía

El género *Capsicum* pertenece a la familia *Solanaceae* y consiste de al menos 25 especies silvestres y semicultivadas y cinco especies domesticadas (*C. annuum*, *C. baccatum*, *C. chinense*, *C. frutescens* y *C. pubescens*) por culturas

establecidas en diferentes regiones de México, Centro y Sur de América (Hernández-Verdugo *et al.*, 1999).

C. baccatum es la especie más comúnmente cultivada en América del Sur con distribución en Brasil, Bolivia, Ecuador, Perú y Chile; sus flores son color crema y presentan puntos amarillos, cafés o verde oscuros en la corola; los cuales son muy característicos de la especie. *C. frutescens* se encuentra en el Centro y Sur de América pero se especula que el centro de domesticación fue Panamá y de aquí se distribuyó hacia México, el Caribe y a algunas regiones de África e India. En Asia se originó *C. chinense* es la especie más común en el caribe y posee gran diversidad en Brasil, su principal centro de domesticación. Entre sus principales cualidades se encuentra su extremada pungencia y es el chile habanero uno de sus más importantes representantes (Antonious *et al.*, 2009). La especie *C. pubescens* fue domesticada en los Andes y su mayor distribución se encuentra desde México hasta Perú; esta especie produce flores purpuras con largos nectarios, y su principal característica es la presencia de pubescencia en las hojas y la coloración oscura de las semillas. Por la superficie de cultivo, popularidad y pungencia, el chile manzano es uno de sus principales exponentes (Bosland y Votava, 2000).

2.6 Diversidad Genética de *Capsicum annum* L.

Capsicum annum es la especie más ampliamente conocida y de mayor importancia económica debido a su distribución y diversidad. Actualmente tiene una distribución mundial, principalmente desde Sudamérica hasta Arizona; sin embargo, la domesticación ocurrió en México y América Central en donde se encuentran una amplia diversidad derivada del antecesor silvestre chiltepín (*C. annum* var. *aviculare*). Dicha diversidad se clasifica en tipos de acuerdo a características del fruto, como la pungencia, color, forma, sabor, tamaño y uso (Pozo, 1981; Smith *et al.*, 1987; Bosland, 1992; Aguilar-Rincón *et al.*, 2010).

Se considera que la diversidad fitogenética es básica para la humanidad al representar la seguridad alimentaria. Parte de la diversidad la ha generado el hombre a través de la domesticación de plantas a lo largo de miles de años. Dada la gran diversidad de tipos de chiles cultivados y silvestres que hay en México, la amplia diversidad, distribución y los diversos usos que se dan a los frutos, la importancia económica de este cultivo es evidente. Sin embargo, existe un problema con la gran diversidad pues solo se conoce y aprovecha a nivel regional o local (Laborde y Pozo, 1989; Aguilar-Rincón *et al.*, 2010).

Se cultivan comercialmente 15 tipos de chile de esta especie de los 75 conocidos. Existen muchos nombres comunes que varían de una región a otra, e incluso, dos tipos de chile distintos pueden recibir el mismo nombre en regiones diferentes (Laborde y Rendón, 1989).

Los tipos de chile utilizados en esta investigación pertenecen a la clasificación de pungentes y algunas de sus características han sido señaladas por Pozo (1981) y Aguilar-Rincón *et al.* (2010).

El chile ancho es uno de los tipos más importantes de México. Se caracteriza por presentar frutos en forma triangular o acorazonada, con pericarpio grueso y una marcada depresión en la base. En general los frutos tienen entre 10-15 cm de largo y 4-10 cm de ancho. En estado inmaduro son de color verde oscuro y en la madurez suelen ser rojos o café oscuro. La comercialización aunque puede ser en verde es principalmente como fruto deshidratado. El área de cultivo en México se concentra en los estados de Zacatecas, Durango, San Luis Potosí, Guanajuato y en menor grado en Puebla.



Figura 1. Chile ancho a) inmaduro y b) maduro.

El chile guajillo es uno de los cuatro tipos más importantes en el país por su volumen de producción. Los frutos son alargados y puntiagudos de tamaño entre 6 y 12 cm de largo y 2.5 cm de ancho con pericarpio delgado que se torna traslucido al secarse. Generalmente los frutos se cosechan cuando están completamente secos, forma principal de consumo. Su cultivo se realiza bajo condiciones de riego en los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Durango, Michoacán, Aguascalientes y Guanajuato.



Figura 2. Chile guajillo a) inmaduro y b) maduro.

El nombre del chile de árbol proviene de su hábito de crecimiento pues asemeja un árbol. Los frutos son delgados, largos y puntiagudos de 5 a 8 cm

de largo y 0.5 a 1 cm de ancho; pueden estar en posición pendular o erecta en las axilas. El color inmaduro puede presentar diversos tonos, desde el amarillo al verde oscuro y el color del fruto maduro oscila de naranja a rojo. Se cultiva en varios estados de la República Mexicana como son: Jalisco, Zacatecas, norte de Nayarit, sur de Sinaloa y San Luis Potosí.



Figura 3. Chile de árbol a) inmaduro y b) maduro.

2.7 Análisis de Crecimiento Vegetal

El análisis de crecimiento vegetal es una aproximación holística, explicativa e integral que es básico para comprender mejor los procesos fisiológicos que determinan la producción vegetal y así fundamentar más racionalmente las prácticas de manejo del cultivo la función de los vegetales; éste usa datos primarios como pesos, áreas y volúmenes de componentes de la planta para investigar los procesos que ocurren dentro de ella y entenderla como un todo (Hunt *et al.*, 2002; Azofeifa y Moreira, 2004).

Este tipo de análisis trata de explicar matemáticamente las variaciones en materia seca y área foliar de los organismos en función del tiempo, por lo que para realizarlo se necesita obtener el peso seco de la planta o de cada uno de sus órganos y del área foliar, en intervalos de tiempo durante el desarrollo del vegetal (Borrego *et al.*, 2000).

La utilización de curvas de crecimiento es típica del análisis de crecimiento. Éstas reflejan el comportamiento de una planta en un ecosistema particular con respecto al tiempo. Sirven también para decidir el momento apropiado para la realización de prácticas culturales y así obtener la respuesta esperada de la planta (Casierra *et al.*, 2007).

2.7.1 Índices de Eficiencia Fisiológica

El crecimiento vegetal se puede analizar mediante el cálculo de índices de eficiencia, los cuales se pueden determinar con el contenido de materia seca de la planta completa o el de sus diferentes órganos. Estos índices tienen significado biológico, muestran que un ambiente particular o práctica de manejo es o no más conveniente para una especie que para otra y comparan el funcionamiento de diferentes especies o variedades creciendo bajo las mismas condiciones (Hunt, 1978).

El análisis de crecimiento con el uso de índices de eficiencia fisiológica se puede realizar en plantas individuales y en comunidades. En plantas individuales se utilizan la tasa relativa de crecimiento (TRC), la tasa absoluta de crecimiento (TAC), la tasa de asimilación neta (TAN), la relación de área foliar (RAF) y el área foliar específica (AFE). En comunidades, particularmente en agricultura, y en algunos estudios de producción en vegetación natural se utilizan el índice de área foliar (IAF), la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y la duración del área foliar (DAF) (Hunt, 1978).

2.7.1.1 Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC)

Representa la ganancia en peso por unidad de tiempo (Hunt, 1978) y está en función de la cantidad de material en crecimiento presente y la tasa de funcionamiento del mismo con relación a la influencia del ambiente. Durante la ontogenia de la planta, hay un periodo en que la tasa del crecimiento es cada vez mayor, seguido por una etapa en que se mantiene más o menos constante,

para luego comenzar a disminuir, de tal forma que se vuelve negativa porque la muerte de las hojas es superior al crecimiento nuevo (Milthorpe y Moorby, 1982)

2.7.1.2 Tasa Relativa de Crecimiento (TRC)

La TRC explica como el crecimiento ya efectuado contribuye al nuevo que se está verificando, de tal modo que representa el incremento en peso seco por unidad de peso seco presente por unidad de tiempo. Ésta proporciona una conveniente integración del funcionamiento de varias partes de la planta pues puede ser calculada para cada órgano vegetal siendo útil para comparar diferencias entre especies y tratamientos en condiciones uniformes (Hunt, 1978). De manera general, ésta tasa disminuye con el transcurso del tiempo, ya que la cantidad de células que se están diferenciando en tejidos y órganos es mayor con respecto a la cantidad de células meristemáticas (Mora *et al.*, 2006).

2.7.1.3 Tasa de Asimilación Neta (TAN)

Esta tasa corresponde a la ganancia en peso por unidad de área por unidad de tiempo (Hunt, 1978) y es una medida indirecta de la fotosíntesis. La TAN disminuye al avanzar la ontogenia del cultivo y esto se debe al sombreado de las hojas superiores sobre las inferiores, a la disminución de la capacidad fotosintética de las últimas hojas formadas y a los efectos de los lugares de demanda sobre la fotosíntesis (Milthorpe y Moorby, 1982).

2.7.1.4 Índice de Área Foliar (IAF)

Dado que la tasa de asimilación neta proporciona una adecuada estimación de la eficiencia de las hojas de un cultivo como productoras de materia seca, entonces el conocer la cantidad de hojas del cultivo es necesario para evaluar su rendimiento. El área foliar por planta no toma en cuenta el espaciamiento

entre plantas, un factor que debe estar involucrado en la estimación de la cantidad de hojas de todo un cultivo. Por lo tanto, el índice de área foliar se define como la cantidad de hojas con relación al área de cultivo (Hunt, 1978).

2.8 Acumulación y Distribución de Biomasa

La tasa fotosintética determina la cantidad total de carbono fijado disponible en la hoja; sin embargo, la cantidad utilizable para translocación depende de una secuencia de eventos metabólicos. La regulación de la distribución de carbono fijado en varias rutas metabólicas es llamada asignación; el cual puede ser usado para síntesis de compuestos de almacenamiento, utilización en el metabolismo y síntesis de compuestos de transporte.

Las demandas compiten por fotoasimilados que están siendo exportados por las fuentes. Tal competición determina la distribución diferencial de fotoasimilados entre las distintas demandas, la cual se denomina partición; parámetro de considerable importancia en la determinación de la productividad de las especies cultivadas. La partición de metabolitos entre los diferentes órganos depende, además de los factores de posición y distancia de las fuentes, de su fuerza como demanda, que es la capacidad de atraer y acumular (o utilizar) fotoasimilados (García y Guardiola, 2000; Taiz y Zeiger, 2010).

Los procesos de asignación, incluyendo la habilidad de una demanda de almacenar o metabolizar azúcares importados, afectan su habilidad para competir por azúcares disponibles. Los eventos en fuentes y demandas deben ser sincronizados. La partición determina los patrones de crecimiento, y tal crecimiento debe ser balanceado entre el meristemo apical del vástago (productividad fotosintética) y el meristemo apical de raíz (absorción de agua y minerales). En este sentido, partición y asignación interactúan una con otra (Taiz y Zeiger, 2010).

El rendimiento de un cultivo está determinado por su capacidad de acumular biomasa en los órganos de interés y un incremento proporcional de la biomasa destinada a estos órganos garantiza un incremento del rendimiento. La distribución de materia seca entre los diferentes órganos de una planta tiene un papel fundamental en la producción de un cultivo y es el resultado final de un conjunto ordenado de procesos metabólicos y de transporte que gobiernan el flujo de fotoasimilados a través de un sistema fuente-demanda (Peil y Gálvez, 2005).

2.9 Desarrollo de las Semillas

La formación, dispersión y germinación de semillas son estados cruciales en el ciclo de vida de las plantas. La tolerancia a la desecación, la movilidad de sustancias de reserva y la habilidad para programar la germinación para el momento con mejores condiciones ambientales son factores importantes en la sobrevivencia de muchas especies.

En la dieta humana, las semillas constituyen una de las principales fuentes de alimentos (por ejemplo, cereales y legumbres), y estos cultivos a su vez dependen de las semillas como propágulos para el establecimiento de nuevos cultivos cada año. Por ejemplo, en el cultivo de chile, donde éstas representan el principal método de reproducción (Nonogaki *et al.*, 2007).

Las semillas son estructuras complejas que consisten de tres componentes principales: el embrión que desarrolla en una planta vegetativa; el endospermo que provee nutrimentos para el desarrollo del embrión durante los primeros estados de la plántula y la testa que cubre al resto de los componentes para protegerlos y controlar la germinación (Bewley y Black, 2000; Blasiak *et al.*, 2006).

La formación de estas estructuras y la adquisición de otras características se dividen en tres fases durante el desarrollo de la semilla: histodiferenciación, acumulación de reservas y adquisición de tolerancia a la desecación (Taiz y Zeiger, 2010). En cada uno de estos estados se incluye una serie de reacciones a nivel celular que determina el inicio y la conclusión de los procesos mediante la activación o silenciamiento de miles de genes (Nonogaki *et al.*, 2007).

La histodiferenciación ocurre inmediatamente después de la polinización, cuando el ovulo se activa para iniciar el desarrollo de las principales estructuras de la semilla: el embrión, el endospermo y las cubiertas seminales. El crecimiento inicial de la semilla se debe a la división y al alargamiento celular que se completan en los primeros días de su formación (Bradford, 2004). En las semillas de chile, el embrión proviene de un óvulo campilotropo por lo que está curvado sobre sí mismo. Consta del eje embrionario con dos cotiledones unidos al hipocotilo, la radícula dirigida hacia la región del hilio y la plúmula o epicótilo, de donde se forman las primeras hojas. Estas semillas en general tienen una forma aplastada hemidiscoidal, en donde el hilio se localiza en el lado más recto y tienen la superficie relativamente lisa sin aspecto pubescente (Nuez *et al.*, 2003).

Seguido a este crecimiento, se presenta la acumulación de reservas en órganos de almacenamiento; esto disminuye el contenido de humedad debido a que los materiales de reserva sustituyen el agua de las células (Bradford, 2004). En chiles, el contenido de agua de las semillas declina en proporción con la acumulación de la materia seca, la cual resulta en un incremento de reservas pero ya sin presentarse incremento en el tamaño seminal (Blasiak *et al.*, 2006).

Las sustancias de reserva se transportan principalmente por el floema. La fuente más importante de éstas son las hojas, y en algunas plantas, los tejidos de los frutos verdes proveen cierta cantidad (Bradford, 2004). No existe conexión simplástica entre la cubierta seminal y el embrión ni el endospermo; por lo tanto, los tejidos embrionarios reciben todos los nutrientes vía

apoplástica (Patrick y Offler, 2001). Los compuestos específicos acumulados por las semillas varían entre especies pero se agrupan generalmente en carbohidratos, lípidos, proteínas y fitatos (Taiz y Zeiger, 2010).

El almidón es el principal carbohidrato almacenado en semillas. Se acumula intracelularmente en gránulos. Algunas semillas acumulan otros tipos de carbohidratos tales como hemicelulosa en las paredes celulares; mananasas y galactanasas que usualmente forman galatomananos; en semillas maduras es común encontrar sacarosa, rafinosa, estaquiosa, y otros azúcares no reducidos como glucosa y fructosa. Estos carbohidratos se utilizan durante la respiración temprana seguida de la imbibición pero también juegan un papel importante en la tolerancia a la desecación y mantenimiento de la longevidad durante el almacenamiento (Obendorf, 1997; Peterbauer y Richter, 2001).

El almacenamiento de lípidos ocurre en forma de triacilglicéridos que se concentran en cuerpos lipídicos u oleosomas dentro de la célula. Un triacilglicérido se compone de tres ácidos grasos, comúnmente ácido palmítico (16:0); oleico (18:1); linoleico (18:2); esteárico (18:0) y linolénico (18:3), y una molécula de glicerol (Bradford, 2004).

En la etapa de acumulación de reservas de la semilla se sintetizan grandes cantidades de proteínas bajo el mando de diversos genes y éstas se acumulan en organelos llamados cuerpos proteicos (Bewley y Black, 2000; Bradford, 2004).

El fitín es el mayor componente de reserva de fósforo en la semilla y otros minerales inorgánicos como potasio, magnesio y calcio. Se localiza en forma de globoides asociados a algunos cuerpos proteicos; la deposición de estos ocurre simultáneamente con el almacenamiento de proteínas (Taiz y Zeiger, 2010).

En las semillas de chile es característico que el endospermo rodee al embrión y sea el principal material de reserva. Éste contiene una variedad de sustancias de reserva de las antes mencionadas; de las que, las proteínas y

especialmente los carbohidratos son catalizados para liberar energía metabólica que se utiliza para el reinicio del crecimiento del embrión durante la germinación (Cochrane, 2000; Nuez *et al.*, 2003).

La deposición de estos materiales durante el desarrollo de la semilla de chile son descritos por Blasiak *et al.* (2006) quienes observaron que a los 10 días después de anthesis (dda) se depositan proteínas en las membranas de unas pequeñas vesículas en el embrión; sin embargo, los cuerpos proteicos bien conformados se observan en células del embrión hasta los 30-35 dda sugiriendo que se formaron de la fusión de las proteínas contenidas en las vesículas de los estados tempranos de embriogénesis. Mientras que los gránulos de almidón estuvieron presentes en las células de los cotiledones a partir de los 25 dda pero no en estados tardíos. Los lípidos y las proteínas fueron las mayores reservas en los cotiledones a los 35 dda, así como en embriones maduros.

La deshidratación de una semilla contribuye a la dispersión de ésta y permite su sobrevivencia durante largos periodos (Bradford, 2004). La tolerancia a la desecación está dada por la síntesis de proteínas y azúcares específicos que aunque se sintetizan durante las fases iniciales del desarrollo, cuando el contenido de ácido abscísico es aún elevado, su acumulación se acelera durante la deshidratación, alcanzando el máximo en la madurez; debido a esto, las proteínas se conocen como abundantes en embriogénesis tardía (LEA por sus siglas en inglés). Éstas se caracterizan por componerse de aminoácidos hidrofílicos que las hacen solubles en agua y resistentes a la desnaturalización causada por altas temperaturas. Se han encontrado evidencias de la presencia de estas proteínas en otros órganos de la planta como respuesta a estrés ambiental y a la acumulación de ácido abscísico; esto sugiere que éstas actúan en el mantenimiento de la conformación de la membrana celular durante la deshidratación (Bewley y Black, 2000; Bradford, 2004).

En semillas de chile dulce se observó la ausencia de LEA's en los estados iniciales de madurez de la semilla (40 dda). Sin embargo, estas proteínas se expresaron con poca intensidad en semillas obtenidas de frutos cosechados 50 dda y almacenados 12 días. En semillas de 60 y 70 dda las proteínas se hicieron presentes en mayores cantidades indicando que su acumulación ocurre después del estado de maduración del fruto pues se asociaron a la etapa de madurez fisiológica, donde la semilla inicia con la adquisición de tolerancia a la desecación (Vidigal *et al.*, 2009).

El disacárido trealosa es importante en la adquisición de tolerancia a la desecación porque cuando hay estrés hídrico, la estructura del disacárido le permite remplazar al agua en la membrana celular y así mantener su estructura. Este carbohidrato también mantiene la estructura de algunas proteínas durante la deshidratación y evita su desdoblamiento y desnaturalización. En algunas semillas la trealosa está ausente; en estos casos, la sacarosa en conjunto con algunos oligosacáridos puede realizar la función de ésta al crear un estado vidrioso en tejidos secos que disminuye la velocidad de las reacciones químicas que promueven la degradación de los componentes de la semilla (Buitink *et al.*, 2002).

2.10 Germinación y Latencia

La germinación de una semilla se conoce biológicamente como el momento en que el embrión reactiva su crecimiento y ocurre la protrusión radicular; mientras que, en tecnología de semillas se considera que una semilla germinó hasta que ha dado origen a una plántula completa (ISTA, 2004). Los procesos fisiológicos asociados con la germinación son similares a los que suceden durante el crecimiento normal de la planta; sin embargo, los patrones de expresión de genes durante ésta son muy característicos (Ma *et al.*, 2005).

Sobre la germinación de semillas de chile inciden diversos factores, destacando la necesidad de humedad y aireación, así como un rango térmico

entre 20 y 30 °C donde la germinación es más rápida a esta última, mientras que a temperatura de 35 °C o mayores ya no hay germinación y la presencia o ausencia de luz no es un factor para la germinación (Bosland y Votava, 2000; Wall *et al.*, 2002; Nuez *et al.*, 2003). Cuando una limitante para la germinación y el desarrollo de plántulas es la baja temperatura, el ácido 5- aminolevulénico ha mostrado evitar los efectos negativos de esta condición (Korkmaz y Korkmaz, 2009).

Muchas semillas presentan un efecto de latencia que inicia durante la fase intermedia de su desarrollo; ésta previene la germinación de las semillas cuando aún están en la planta madre. En muchos casos, la latencia continua por un largo periodo después de la cosecha y se requiere de condiciones específicas para eliminarla (Baskin y Baskin, 1998). El principal responsable de controlar el desarrollo de la semilla y la latencia es el ácido abscísico (ABA) (Koorneef *et al.*, 2002) ya que a nivel molecular estimula la expresión de muchos genes asociados con el desarrollo de la semilla (Bewley y Black, 2000). En muchos casos, el contenido de ABA es máximo cuando la semilla tiene el mayor crecimiento, después declina hasta alcanzar bajos niveles en la madurez y así permitir la germinación (Kermode, 1995).

Las semillas de chile presentan un comportamiento ortodoxo manteniéndose viables por periodos de 5 a 8 años con contenidos de humedad entre 4 y 6 % y temperatura ambiental de -10 °C. Generalmente los cultivares de *C. annuum* no presentan fenómenos acusados de latencia en las semillas (Nuez *et al.*, 2003; Bonilla *et al.*, 2004). Sin embargo, se ha observado que semillas cosechadas en estado inmaduro pueden presentar este problema. Además, se ha reportado la presencia de latencia en semillas de especies silvestres de *C. annuum* (Randle y Honma, 1981; Bosland y Votava, 2000); sin embargo, se recomienda extraer las semillas después de permanecer algunos días dentro del fruto para remover la latencia (Randle y Honma, 1981). Tratamientos con nitrato de potasio (2 g L⁻¹) y

ácido giberélico (100-1000 ppm) son efectivos para eliminar esta condición (ISTA, 2004).

2.11 Calidad de Semillas

La calidad de semilla es un factor que define fuertemente el éxito o la falla de un cultivo, particularmente cuando éste se enfrenta a ambientes de producción estresantes (Bewley y Black, 2000). Por lo tanto, el reto de la producción de semillas es ofrecer semillas de calidad.

Una semilla se puede ver afectada por un sinnúmero de factores genéticos, fisiológicos y citológicos, así como patológicos y mecánicos (Bradford, 2004); de este modo, hablar de calidad de semillas implica un conjunto de atributos que contribuyen al establecimiento de la planta en campo, en donde los factores genéticos, sanitarios, físicos y fisiológicos se definen como más importantes (Hernández, 2011).

La calidad genética es importante porque a través de ésta se garantiza que la semilla genere plántulas con características deseadas; en Chile, la calidad genética garantiza el mantenimiento del rendimiento, pungencia, forma del fruto, tamaño y color (Wall, *et al.*, 2002). Esta calidad se obtiene mediante el fitomejoramiento, a través de la introducción, cruzamiento y selección de material genético sobresaliente (Hernández, 2011); por lo tanto, está determinada por el genotipo de la variedad o el híbrido.

La sanidad es uno de los principales factores responsables de la expresión de la calidad (Bringel *et al.*, 2001). Se considera que una semilla libre de organismos que constituyan factores de riesgo a la producción, tales como hongos, bacterias, y virus, posee calidad fitosanitaria (Hernández, 2011).

Las características de las semillas como el contenido de humedad, el peso por volumen y pureza de éstas, son considerados factores de calidad física. Adicionalmente, las características de color, tamaño, peso y daños visibles por

hongos e insectos son cualidades importantes para determinar este tipo de calidad (Hernández, 2011). Es importante tener en cuenta no sólo los daños visibles, sino también los efectos latentes causados especialmente por aplastamientos, que resultan ser más serios que las quebraduras, ya que favorecen la entrada de patógenos y por ende decrecimiento también de la calidad fitosanitaria (Vieira *et al.*, 1994).

La calidad de la semilla, en términos de viabilidad y vigor, se conoce como fisiológica y se establece durante el periodo de desarrollo del cultivo.

La viabilidad se refiere al porcentaje de semillas en un lote que son capaces de germinar y formar una planta normal en condiciones óptimas, pero, no es suficiente para propósitos de agricultura que una semilla complete la germinación; además, debe poseer la habilidad para germinar bajo un amplio rango de condiciones muchas veces adversas en campo, a esto se le conoce como vigor (Bradford, 2004).

El vigor de la semilla depende de la constitución genética de la planta madre y del ambiente que la rodea. Semillas vigorosas producen plantas fuertes, uniformes y saludables que tienen un mejor desarrollo en su establecimiento y adicionalmente exhiben relativamente una mayor longevidad (Doijode, 2001).

2.12 Madurez del Fruto y Extracción de Semillas

En muchas especies vegetales, las semillas varían en su capacidad germinativa entre poblaciones y entre individuos. Algunas de estas variaciones pueden ser de origen genético, pero en la mayoría se conoce que se deben a modificaciones del ambiente (Fenner, 2000).

Factores como la posición de la inflorescencia en la planta madre o la posición de la semilla en el fruto pueden influenciar la morfología, el potencial de germinación y el vigor de las semillas. En Chile, aunque la mayoría de las

semillas se sitúan en la región de la placenta central se han reportado diferencias en la viabilidad en función de su posición dentro del fruto, pues se dice que semillas de la porción basal tienen mayor potencial de viabilidad y vigor que aquellas de la parte media del fruto (Doijode, 2001; Nuez *et al.*, 2003).

Sin embargo, más que la posición dentro del fruto, la más alta calidad de semilla se ha asociado en muchas especies con la máxima acumulación de materia seca, etapa denominada madurez fisiológica. Ésta marca el fin del transporte vía el floema hacia la semilla y el desarrollo de cambios en los tejidos de unión con la planta madre; en este punto se obtiene la máxima viabilidad y vigor. No obstante, en muchas especies, la calidad de semilla continúa en incremento después de esta máxima acumulación (Bradford, 2004).

Los efectos de la madurez de la semilla en la calidad son particularmente evidentes; en general la habilidad del embrión para germinar si se remueve prematuramente se desarrolla relativamente temprano, incluso previo a la acumulación del máximo peso de materia seca, pero en este momento las semillas podrían no sobrevivir la deshidratación pues la tolerancia a la desecación se desarrolla subsecuentemente mientras el vigor incrementa paulatinamente; incluso, los últimos 10 días del desarrollo de la semilla previos a la deshidratación tienen importante influencia en la subsecuente calidad y vigor (Demir y Ellis, 1992; Sanhewe y Ellis, 1996).

La madurez fisiológica de las semillas de chile se ha asociado con la maduración del fruto (Sayed y Essam, 1952); el aspecto más visible de este proceso en la mayoría de las variedades es el cambio de color del fruto de verde a rojo o a otros colores como amarillo, chocolate-marrón o naranja (Nuez *et al.*, 2003), que generalmente ocurre 80-90 días después del trasplante, dependiendo del cultivar (Salunkhe, 2003).

Frutos cosechados tempranamente dan semillas de baja calidad, con baja viabilidad y vigor; mientras que los frutos cosechados en su color indicador de madurez proveen mayor viabilidad de semillas (Sayed y Essam, 1952). Semillas que se han cosechado en las primeras etapas de su formación aún no han alcanzado el desarrollo morfológico y fisiológico que les permita una germinación óptima. La pobre geminación de semillas inmaduras ha sido atribuida a bajos niveles de nutrientes, enzimas y hormonas indispensables para que dicho proceso se lleve a cabo correctamente (Kermode, 1995). Algunos trabajos que han reportado esta asociación entre la madurez del fruto de chile y la de la semilla son los de Edwards y Sundstrom (1987); Valdés *et al.* (1992); Sánchez *et al.* (1993) y Cavero *et al.* (1995).

El tiempo de maduración poscosecha tiene un efecto significativo en la calidad. Randle y Honma (1981) mencionaron que las semillas de chile completan su madurez fisiológica una vez que los frutos cosechados pasaron por un periodo de reposo que varía de una a seis semanas según el tipo de chile. Sánchez *et al.* (1993) notaron que las semillas de chile extraídas de frutos maduros en color verde no germinan, pero que después de un periodo de 14 días de almacenamiento se obtiene germinación.

Las semillas que están completamente maduras tienen un mejor comportamiento durante el almacenamiento. Por eso, las semillas de chile cosechadas en el estado de madurez muestran más alta germinación y un alto vigor en plántulas y pueden ser almacenadas por más tiempo bajo condiciones controladas (Doijode, 2001).

2.13 LITERATURA CITADA

- Antonious, G. F.; T. Berke and R. L. Jarret. 2009. Pungency in *Capsicum chinense*: variation among countries of origin. *Journal of Environmental Science and Health Part B* 44:179-184.
- Aguilar-Rincón, V. H.; T. Corona Torres; P. López López; L. Latournerie Moreno; M. Ramírez Meraz; H. Villalon Mendoza y J. A. Aguilar Castillo. 2010. Los Chiles de México y su Distribución. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, IT-Conkal, UANL, UAN. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 114 p.
- Baskin, C. C. and J. M. Baskin. 1998. *Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination*. Academic Press, New York, N. Y.
- Bewley, J. D and M. Black. 2000. *Seed Technology and its Biological Basis*. Sheffield Academic Press Ltd. Sheffield, England. 419 p.
- Blasiak, J.; A. Kuang; C. S. Farhangi and M. E. Musgrave. 2006. Roles of intra-fruit oxygen and carbon dioxide in controlling pepper (*Capsicum annuum* L.) seed development and storage reserve deposition. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 131(1):164-173.
- Bonilla, E.; C. I. Cardozo y M. A. García. 2004. Determinación de la condición fisiológica de la semilla de *Capsicum* spp y efecto del método de secado para su almacenamiento. *Acta Agronómica (Colombia)* 53 (1/2):37-44.
- Bosland, P. W. 1992. Chiles: a diverse crop. *HortTechnology* 2 (1):6-10.
- Bosland, P. W. 1997. *Capsicum: A Comprehensive Bibliography*. 5th ed. The Chile Pepper Institute, Las Cruces, New Mexico.

- Bosland, P. W. and E. J. Votava. 2000. Peppers: Vegetable and Spice Capsicums. CABI Publishing. New York. 204 p.
- Bradford, K. J. 2004. Seed Production and Quality. Department of Vegetable Crops. University of California. Davis, California, U.S.A. 134 p.
- Bringel J. M. M.; M. H. D. Moraes; J. O. M. Menten and I. P. Bedendo, 2001. Qualidade sanitária e fisiológica de sementes de soja produzidas na Região de Balsa, Maranhão. Summa Phytopathologica, Jaboticabal 27(4):438-441.
- Buitink, J.; F. A. Hoekstra and O. Leprince. 2002. Biochemistry and biophysics of tolerance systems. In Black M, Pritchard, HW, eds, Dessication and Survival in Plants. Drying Without Dying. CABI Publishing, Wallingford, U. K. pp: 293-318.
- Cavero, J.; Ortega, R. G.; Zaragoza, C. 1995. Influence of fruit ripeness at the time of seed extraction on pepper (*Capsicum annuum*) seed germination. Scientia Horticulturae 60:345-352.
- Cichewicz, R. H. and P. A., Thorpe. 1996. The antimicrobial properties of chile peppers (*Capsicum* species) and their uses in Mayan Medicine. Journal of Ethnopharmacology 52:61-70.
- Cochrane, M. P. 2000. Seed carbohydrates. In: Black M, Bewley, J.D. (eds.) Seed Technology and its Biological Basis. Sheffield Academic Press. Sheffield, U. K. pp. 85-120.
- Demir, I. and R. H. Ellis. 1992. Development of pepper (*Capsicum annuum*) seed quality. Annals Applied Biology 121:385-399.
- Doijode, S. D. 2001. Seed Storage of Horticultural Crops. Haworth Press. New York, USA. 339 p.

- Fenner, M. 2000. *Seeds: The Ecology of Regeneration in Plant Communities*. 2nd Edition. CABI Publishing. 410 p.
- Hernández, L. A. 2011. *Apuntes del Curso de Análisis de Semillas*. Posgrado de Semillas. IREGEP. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Hernández-Verdugo, S.; P. Dávila A. y K. Oyama. 1999. Síntesis del Conocimiento Taxonómico, Origen y Domesticación del Género *Capsicum*. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 64:65-84.
- Howard, K. S. 2011. Cytotoxic activity of verbenaceae (*Daniellia oliveri*) and solanaceae (*Capsicum frutescens*) on breast cancer, prostate cancer, and colon cancer cells. Tennessee State University. 49 p.
- ISTA (International Seed Testing Association). 2004. *International rules for seed testing*. Bassersdorf, CH-Switzerland.
- Kermode, A. R. 1995. Regulatory mechanisms in the transition from seed development to germination: interactions between the embryo and the seed environment. *In: J. Kigel, G. Galili, Eds. Seed Development and Germination*. Marcel Dekker, Inc. New York. pp: 273-332.
- Koorneef, M.; L. Bentsink and H. Hilhorst. 2002. Seed dormancy and germination. *Current Opinion in Plant Biology* 5:33-36.
- Korkmaz, A. and Y. Korkmaz. 2009. Promotion by 5-aminolevulinic acid of pepper seed germination and seedling emergence under low temperature stress. *Scientia Horticulturae* 119:98-102.
- Laborde, J. A. y O. Pozo. 1984. *Presente y Pasado del Chile en México*. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (SARH-INIA) Publicación Especial No. 85. México. 80 p.

- Laborde, J. A. y E. P. Rendón. 1989. Tomatoes and Peppers in Mexico: Commercial Production and Research Challenges. *In*: S.K. Green (ed.). Tomato and Pepper Production in the Tropics, AVRDC, Formosa: pp. 521-535.
- Long-Solís, J. 1986. Capsicum y su Cultura. La Historia del Chilli. Fondo de Cultura Económica. México. 181 p.
- Ma, L.; N. Sun; X. Liu; Y. Jiao; H. Zhao and X. W. Deng. 2005. Organ-specific expression of *Arabidopsis* genome during development. *Plant Physiology* 138:80-91.
- Nuez, F., R. Gil Ortega y J. Costa. 2003. El Cultivo de Pimientos, Chiles y Ajíes. Ediciones Mundi-Prensa Madrid-España. 586 p.
- Obendorf, R. L. 1997. Oligosaccharides and galactosyl cyclitols in seed desiccation tolerance. *Seed Science Research* 7:63-74.
- Patrick, J. W. and C. E. Offler. 2001. Compartmentation of transport and transfer events in developing seeds. *Journal of Experimental Botany* 52:551-564.
- Peterbauer, T and A. Richter. 2001. Biochemistry and physiology of raffinose family oligosaccharides and galactosyl cyclitols in seeds. *Seed Science Research* 11:185-197.
- Pozo, O. 1981. Descripción de Tipos y Cultivares de Chile (*Capsicum spp.*) en México. INIA, México.
- Randle, W. M. and S. Honma. 1981. Dormancy in peppers. *Scientia Horticulturae* 14:19-25.

- Rylski, I. 1986. Pepper (*Capsicum*). In: CRC Handbook of Fruit Set and Development. Monselise, S. P. (ed.). CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida. pp: 341-354.
- Sánchez, V. M.; F. J. Sundstrom; G. N. McClure and N. S. Lang. 1993. Fruit maturity, storage and postharvest maturation affects bell pepper (*Capsicum annuum* L.) seed quality. *Scientia Horticulturae* 54:191-201.
- Sanhewe, A. J. and R. H. Ellis. 1996. Seed development and maturation in *Phaseolus vulgaris*. II. Post-harvest longevity in air-dry storage. *Journal of Experimental Botany* 47:959-965.
- Salunkhe, D. K. 2003. Tratado de Ciencia y Tecnología de las Hortalizas: Producción, Composición, Almacenamiento y Procesado. Editorial ACRIBIA S. A. Zaragoza, España. 739 p.
- Sayed, M. S. and M. Essam. 1952. Viability of seeds harvested from fruits at different stages of maturity. *Proceedings of American Society for Horticultural Science* 60:327-329.
- Schoch, P. G. 1972. Effects of shading on structural characteristics of leaf and yield of fruit in *Capsicum annuum* L. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 97:461-464.
- Smith, P. G.; B. Villalon and P. L. Villa. 1987. Horticultural classification of pepper grown in the United States. *HortScience* 22:11-13.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2010. *Plant Physiology*. 5th Ed. Sinauer Associates, Inc., Publishers. Sunderland, Massachusetts. 764 p.
- Valadez, L. A. 1993. *Producción de Hortalizas*. Editorial LIMUSA. México. 298 p.

- Vidigal, D. S.; D. C. F. S. Dias; E. R. V. Von Pinho and L. A. S. Dias. 2009. Sweet pepper seed quality and lea-protein activity in relation to fruit maturation and post-harvest storage. *Seed Science and Technology* 37: 192-201.
- Vieira, C. P.; R. D. Vieira and J. H. N. Paschoalick, 1994. Effects of mechanical damage during soybean seed processing on physiological seed quality and storage potential. *Seed Science and Technology* 22: 581-589.
- Wall, A. D.; R. Kochevar and R. Phillips. 2002. Chile Seed Quality. New Mexico Chile Task Force. Report 4. New Mexico State University and US Department of Agriculture. 6 p.
- Wien, H. C. 1999. Peppers. *In: The Physiology of Vegetable Crops*. Wien, H. C. (ed.). CABI Publishing. Wallingford, UK. pp: 259-293.

III. DISTRIBUCIÓN DE BIOMASA Y EFICIENCIA FISIOLÓGICA DURANTE EL DESARROLLO DE TRES TIPOS DE *Capsicum annuum* L.

3.1 INTRODUCCIÓN

El chile, por el volumen de la producción y su valor nutricional, se encuentra entre las cinco hortalizas de fruto más importantes del mundo. De las especies domesticadas *Capsicum annuum* L. es la especie de chile con mayor diversidad, distribución e importancia, tiene más de 70 tipos conocidos, de los que al menos 15 se cultivan comercialmente (Laborde y Pozo, 1984; Azofeifa y Moreira, 1998; Aguilar-Rincón *et al.*, 2010). Aunque México es el centro de domesticación, ésta especie se distribuye mundialmente.

China e India son los países que reportan la mayor producción de chile verde y seco producido. México es el tercer país productor de chiles verdes y el onceavo de chiles secos de donde obtiene importantes divisas dado que éste es el principal país proveedor de Estados Unidos y Canadá (FAO, 2011; SIAP, 2011).

La mayor cantidad de información sistematizada sobre el cultivo de chile se refiere al manejo agronómico; no obstante, entre otras cosas, es necesario definir aspectos clave como la duración del ciclo, las etapas de desarrollo, la distribución de los fotoasimilados por órganos, pues estos servirán para comprender mejor los procesos fisiológicos que determinan la producción (Azofeifa y Moreira, 2004).

Lo anterior es posible determinarlo a través de la medición del crecimiento mediante la tasa absoluta de crecimiento en función de la cantidad de materia presente y su tasa de funcionamiento en relación con la influencia del ambiente pues son el resultado de la interacción del genotipo, el clima, la disponibilidad

de agua y nutrimentos, y las condiciones biológicas (Gastiazoro, 2000; Taiz y Zeiger, 2010).

El análisis del crecimiento del cultivo permite integrar información para comprender procesos de formación y funcionamiento de las plantas (Hunt *et al.*, 2002) en el que peso seco es el criterio más apropiado para medir el crecimiento y la magnitud del sistema de asimilación de la planta, referido, frecuentemente al área foliar total (Azofeifa y Moreira, 2004).

En cultivos hortícolas, este análisis se ha utilizado para evaluar la respuesta a prácticas de manejo (Ibarra *et al.*, 2001), comparar el rendimiento de variedades de una misma especie en condiciones ambientales similares (Aguilar *et al.*, 2006) o diferentes (Salazar *et al.*, 2008), observar el efecto de la limitación de un factor (Aguilar *et al.*, 2000), analizar la cinética de crecimiento y acumulación de biomasa en el órgano de interés económico (Sedano *et al.*, 2005; Ayala-Garay *et al.*, 2011), entre otros.

De acuerdo con Ho *et al.* (1996), el análisis de crecimiento mediante índices de eficiencia fisiológica (tasa relativa y absoluta del crecimiento, la tasa de asimilación neta, el índice de área foliar, la tasa de crecimiento del cultivo y la duración del área foliar) permite estimar las relaciones fuente-demanda, y en ciertos casos, como se realizó en un estudio en papa (*Solanum tuberosum* L.) para estimar la fuerza y actividad de la fuente (Aguilar *et al.*, 2006).

Como se mencionó, durante su ciclo ontogénico, los vegetales presentan cambios que están en estrecha relación con el genotipo, clima, disponibilidad de agua y condiciones biológicas. El cultivo de chile no es la excepción y además de los factores ambientales, las prácticas agrícolas pueden afectar el desarrollo del cultivo; por tanto, obtener información sobre el crecimiento de este cultivo y de los diferentes tipos que comprenden la diversidad en México es indispensable porque la dinámica de crecimiento y acumulación de biomasa no son conocidas y serviría para fundamentar más racionalmente las prácticas de manejo del cultivo: nutrición, riego, podas, estrategias de protección, entre

otras, principalmente de aquellos más representativos e importantes económicamente por el volumen de su producción como los tipos árbol, ancho y guajillo utilizados en esta investigación.

En este trabajo, mediante un análisis de crecimiento, utilizando la tasa absoluta y relativa del crecimiento, y la fotosíntesis, se comparó la eficiencia fisiológica del chile de árbol, ancho y guajillo en cuanto a aspectos morfológicos y de sus relaciones fuente-demanda.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

En Montecillo, Texcoco Edo. de México (a 40 km de la ciudad de México), se sembraron semillas de tres tipos de chile: ancho (CP-667) colectado en 2005 en San Martín Texmelucan, Puebla; árbol (CP-1037) obtenido en 2007 de Yahualica, Jalisco, y guajillo (CP-1112) originario de Ojo Caliente, Zacatecas (2009). Las poblaciones de chile fueron proporcionadas por el banco de germoplasma del Colegio de Postgraduados, México.

La siembra fue en charolas de unicel de 200 cavidades con sustrato estéril dentro de un invernadero con cubierta de polietileno el 25 de marzo de 2010. Dos semanas después de la emergencia se usó Fertiguano® (1 mL L⁻¹) dos veces por semana hasta el trasplante que se realizó el 25 de mayo en bolsas de polietileno negras 30 x 30 cm. Se usó tierra negra con hojarasca y peat moss 2:1:1 como sustrato. En esta fase se aplicaron tres riegos cada semana y dos fertilizaciones con triple 18 aplicado al sustrato (2 g L⁻¹); más aplicaciones quincenales de Bayfolan Forte (2 mL L⁻¹); y al inicio de la floración (cuando el 50% de las plantas de cada tipo de chile tenían al menos una flor con las anteras expuestas) con NutriCalcio (2 mL L⁻¹) cada dos semanas hasta la fructificación (cuando el 50 % de las plantas de cada tipo presentaron el amarre de al menos un fruto). Previo al trasplante las plántulas se sumergieron en solución fungicida Previcur® (1 mL L⁻¹) + Captan® (1 g L⁻¹) y siete días después

del trasplante (ddt) durante el riego se aplicó solución fungicida Captan® (1 g L⁻¹) al sustrato.

Las macetas de cada tipo de chile se ubicaron en hileras dentro del invernadero sin control artificial del microclima. La distancia entre plantas fue de 40 cm y entre hileras de 70 cm. Se colocó malla sombra (50 %) durante los primeros tres días posteriores al trasplante a una altura de 2 m sobre las macetas para evitar daño por estrés a través de transpiración.

3.2.1 Temperatura del aire

En el invernadero se colocó una sonda (HOBO H8-032-08, Onset Computer Corporation, U.S.A.), para registrar la temperatura (°C) cada 15 minutos.

3.2.2 Variables de biomasa y área foliar

Para el análisis de crecimiento se realizaron muestreos destructivos a los 30, 72, 113, 144 y 176 ddt, se tomaron al azar dos plantas con competencia completa en cada una de las repeticiones. Las plantas se separaron en hojas, tallos, flores, frutos y raíz, el secado de estos órganos se hizo en una estufa con circulación de aire a 70 °C durante 72 horas y posteriormente se registró la biomasa seca (g). Se contó el número de hojas por planta y el área foliar fotosintéticamente activa (cm²) se midió con un integrador de área.

Con los datos ajustados de biomasa de la planta completa, de cada uno de sus órganos y del área foliar, se calcularon los índices de eficiencia (Hunt, 1982): tasa absoluta de crecimiento (TAC), tasa relativa de crecimiento (TRC) y tasa de asimilación neta (TAN), con las formulas siguientes:

$$TAC = \frac{PS_2 - PS_1}{t_2 - t_1}$$

$$TRC = \frac{\ln(PS_2) - \ln(PS_1)}{t_2 - t_1}$$

donde PS_2 y PS_1 son los pesos de la biomasa seca de la planta al final y al inicio de un periodo determinado; t_1 y t_2 es el tiempo transcurrido entre dos muestreos y \ln es el logaritmo natural.

3.2.3 Variables fisiológicas de las hojas

La tasa de fotosíntesis neta se midió con un sistema portátil IRGA entre las 11:30 y las 14:00 horas en dos plantas por tipo de chile durante los muestreos siguientes: (1) a los 30 días después del trasplante (ddt); (2) durante la floración (72 ddt); (3) durante fructificación (110 ddt) y (4) durante la madurez del fruto (150 ddt). En el muestreo 1, la fotosíntesis se midió en hojas maduras del estrato medió y en los siguientes tres muestreos en la hoja madura con demanda directa (flor o fruto) y en una hoja joven del estrato alto de la planta.

3.2.4 Análisis de datos

Los datos de área foliar, peso seco total de la planta y de cada uno de los órganos se ajustaron a funciones polinomiales con base en el mayor coeficiente de determinación (R^2) y el menor error estándar, con el programa para ajustar funciones matemáticas a datos observados Curve Expert Professional versión 1.2.3. 2010-2011 (Daniel G. Hyams®). Los datos obtenidos con los modelos polinomiales se utilizaron para trazar las curvas de acumulación de área foliar y de biomasa de la planta completa y de cada uno de sus órganos con el programa Excel® y con los valores observados de las tasas de fotosíntesis se graficaron las curvas correspondientes en el mismo programa.

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1 Condiciones ambientales

El chile tiene una gran capacidad de adaptación pero tiende a desarrollarse mejor bajo climas cálidos y húmedos que favorecen el crecimiento del cultivo. Durante este experimento, la temperatura promedio fue de 23.8 °C (Figura 4); que se encontró dentro del rango de 20 a 25 °C apropiado para el desarrollo de las plantas (Maroto, 2002).

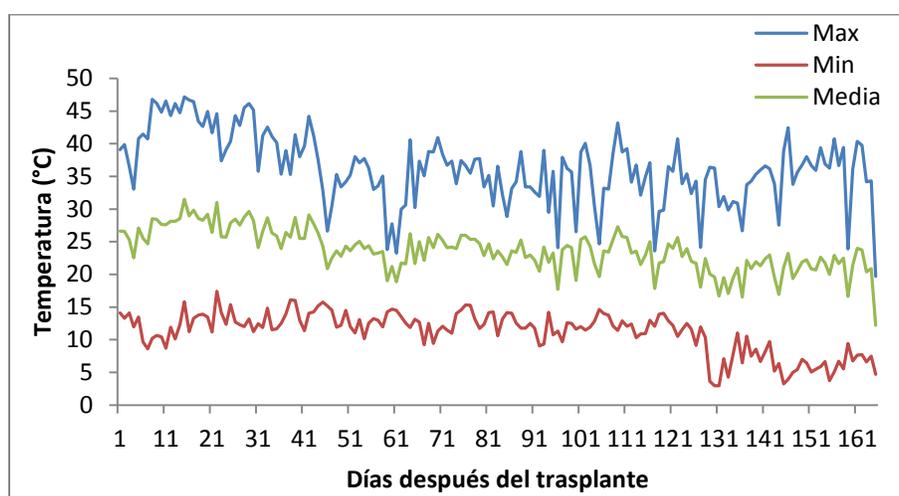


Figura 4. Temperatura ambiental durante el desarrollo del cultivo de chile.

El promedio de máxima temperatura se ubicó en 36.4 °C, que se localizó por arriba del máximo reportado de 35 °C para el crecimiento apropiado del cultivo de chile e incluso, durante el verano, coincidiendo con la floración (después de los 50 ddt), en ciertos momentos del día (entre 12:00 y 14:00 horas) se presentaron temperaturas superiores a 40 °C que probablemente influyeron en el aborto de flores que se presenta con temperaturas por encima de 35 °C (Maroto, 2002).

La temperatura mínima promedio fue de 11.2 °C que pareció no afectar el desarrollo del cultivo que con temperaturas inferiores a 15 °C disminuye y con

menores a 10 °C se detiene (Maroto, 2002; Nuez, 2003). Además, las bajas temperaturas provocan endurecimientos del sistema vascular impidiendo el transporte de agua y fotoasimilados y favorece el cuajado de frutos pequeños de mala calidad. La muerte de las plantas se debió a la exposición a temperaturas de -3 °C a los 197 días de desarrollo, ya que este cultivo no tolera temperaturas congelantes (Nuez, 2003).

3.3.2 Área foliar

La cinética de crecimiento del área foliar de los tres tipos de chile durante el periodo de evaluación siguió una tendencia sigmoideal (Figura 5), lo que coincide con el comportamiento que muestran las plantas y los órganos vegetales en general (Taiz y Zeiger, 2010).

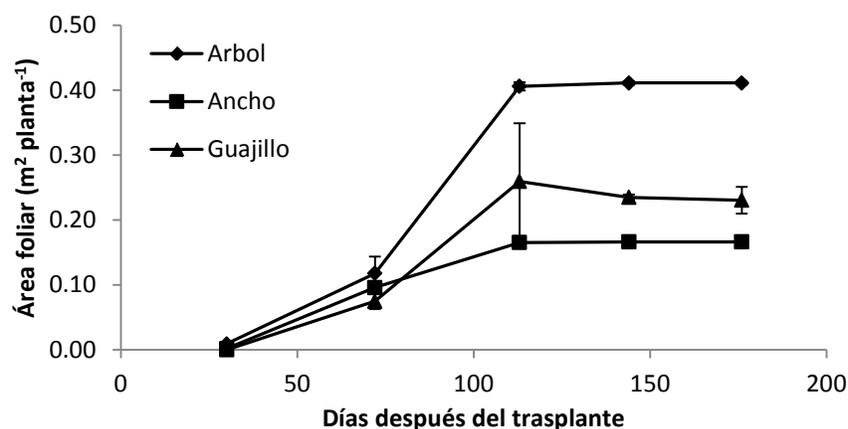


Figura 5. Cinética de acumulación del área foliar por planta de tres tipos de chile.

Modelos polinomiales para tres tipos de chile: “de Árbol” $Y = 4112.15/(1+\exp(14.9856-0.162409*t))^{(1/2.65856)}$ ($R^2= 1$, $CV= 0.24$). “Ancho” $Y = 1661.74/(1+\exp(8.15266-0.117502*t))$ ($R^2= 0.99$, $CV= 96.94$). “Guajillo” $Y=$. “t” es días después del trasplante. “Y” es Área foliar.

La fase de crecimiento lento transcurrió en los primeros 30 ddt donde el área foliar acumulada no representó ni el 25 % del total producida al final del

ciclo. Durante este periodo el crecimiento fue similar y a los 72 ddt se incrementó el área foliar para los tres tipos; el chile ancho ya había alcanzado poco menos del 50 % de su total (0.075 m²) mientras que los otros dos aún estaban muy por debajo de este porcentaje.

En esta investigación el chile de árbol produjo mayor número de hojas (805 hojas planta⁻¹) a los 113 ddt cuando alcanzó su máxima área foliar (0.40 m²), mientras que los tipos ancho y guajillo produjeron menor número de hojas (343 y 327, respectivamente) y obtuvieron áreas máximas de 0.16 y 0.26 m² respectivamente durante el mismo periodo, lo que corrobora que las variaciones importantes en el crecimiento del área foliar dependen principalmente del genotipo que determina dos componentes directos: número de hojas y tamaño de láminas foliares (Kleinkopf *et al.*, 1981).

La presencia de frutos, por ser estos la principal demanda, reduce el crecimiento foliar (Klaring *et al.*, 1996, Azofeifa y Moreira, 2008) tal como ocurrió en los tipos estudiados ya que la expansión del área foliar cesó durante la fructificación y se mantuvo constante hacia el final del ciclo.

3.3.3 Acumulación de biomasa

3.3.3.1 Biomasa de la planta completa

En los tipos de chile estudiados se presentó una cinética sigmoideal de acumulación de biomasa (Figura 6); tal como ocurre con el chile jalapeño (Azofeifa y Moreira, 2004); calabacita (Sedano *et al.*, 2005); papa (Mora *et al.*, 2006 y Aguilar *et al.*, 2006) y chile dulce (González-Real *et al.*, 2008).

En los tres tipos de chile la acumulación de materia seca fue lenta hasta los 72 ddt; a partir de entonces hubo un incremento rápido de la producción de biomasa, lo cual coincide con la fructificación. La fase de incremento exponencial duró hasta los 144 ddt, momento en que existe una estabilización de la curva de crecimiento que duró hasta el final del ciclo.

En las primeras etapas de desarrollo no existieron diferencias entre los tipos de chile, lo que indica que de manera individual cada tipo asimila cantidades similares de carbono en una planta completa. Después de los 113 ddt, las diferencias observadas se debieron probablemente al inicio del periodo de fructificación pues la cantidad de frutos por planta y sus características morfológicas difieren entre los tipos estudiados. El chile ancho, que superó a los otros dos, produce frutos más grandes y pesados, mientras que los frutos del chile de árbol son numerosos pero pequeños.

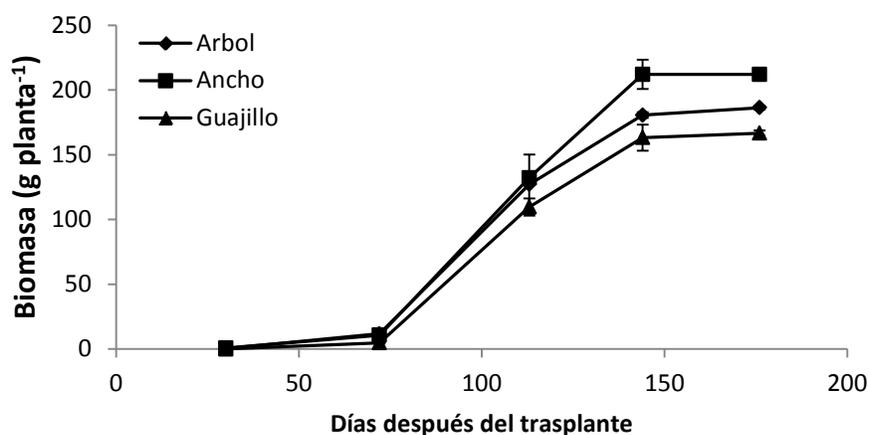


Figura 6. Cinética de la acumulación de biomasa total por planta de tres tipos de chile.

Modelos polinomiales para tres tipos de chile: “de Árbol” $Y = 186.83 / (1 + 6405.31 \cdot \exp(-0.0842677t))$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 0.92$). “Ancho” $Y = 212.058 / (1 + \exp(105.42 - 0.873396 \cdot t))^{(1/14.2178)}$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 3.87$). “Guajillo” $Y = 166.816 / (1 + 51702.6 \cdot \exp(-0.101814t))$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 5.55$). “t” es días después del trasplante. “Y” es Biomasa.

Aunque el área foliar es el principal determinante de la producción de la biomasa en los cultivos agrícolas al asociarse directamente con la cantidad de radiación interceptada y la eficiencia en su transformación (Mora *et al.*, 2006), en los tipos de chile aquí estudiados parece existir diferencia en cuanto a la eficiencia fotosintética, ya que el chile ancho produjo menor tamaño de fuente (Figura 5) y produjo mayor cantidad de MS total (Figura 6) considerándose, por lo tanto, más eficiente.

3.3.3.2 Biomasa de los órganos de la planta

Las hojas presentaron incrementos considerables de biomasa hasta los 113 ddt en los tres tipos y a partir de entonces la biomasa de estas estructuras en los tipos árbol y guajillo se mantuvo mas o menos constante hasta el final del ciclo con 21.1 y 13.6 g respectivamente, tal como sucedió en el chile dulce cultivar UCR 589 (Azofeifa y Moreira, 1998); mientras que en ancho disminuyó a los 143 ddt 31.6 gramos finalizando con esa misma biomasa al final del ciclo (Figuras 7a).

Los tallos de los tipos de árbol y guajillo alcanzaron su máxima biomasa a los 113 ddt (32.4 y 68.9 g, respectivamente); mientras que en el chile ancho fue hasta los 144 ddt (49.4 g) pero sin superar al chile de árbol (Figura 7b). Estas diferencias quizá se deben a que el chile de árbol presentó una mayor altura (154.1 cm contra 96.5 cm) y ramificación (datos no mostrados). Las diferencias entre ancho y guajillo pudieron deberse a que el chile ancho formó tallos más gruesos ya que en cuanto a altura y ramificación fueron similares.

El crecimiento radical fue lento para los tres tipos de chile durante las primeras etapas del ciclo (Figura 7c) pero incrementó rápidamente entre los 72 y 113 ddt sin existir diferencias entre tipos manteniéndose un promedio de 30 g de biomasa a partir de los 113 ddt y hasta el final del ciclo.

La floración ocurrió a partir de los 40 ddt en los tipos ancho y guajillo y alcanzó un máximo a los 113 ddt; en el chile de árbol comenzó a los 49 ddt y se extendió hasta los 144 ddt (Figura 7d). La aportación a la materia seca de estas estructuras fue mínima comparada con las demás; situándose en valores entre 0.3 y 1.3 gramos de un total de hasta 212 gramos de biomasa total (Figura 6). Las diferencias entre tipos se explican genéticamente pues debido a que en cada axila se forma una flor, una baja ramificación provocaría baja floración como ocurrió en el chile guajillo mientras que chile de árbol al ramificar más produjo más flores creándose una correlación positiva entre estas variables.

Conforme los frutos crecieron acumularon biomasa hasta alcanzar un máximo a los 144 ddt en los tipos ancho y guajillo pues es cuando la mayor cantidad de los frutos tienen su tamaño y peso final. En cambio, en el chile de árbol aún a los 176 ddt la acumulación de materia seca en frutos se incrementó (Figura 7e). Entre tipos se presentan diferencias por efecto del tamaño de los frutos que está definido genéticamente, es decir, aunque el mayor número de frutos se produjo en el chile de árbol (90 frutos planta⁻¹) éstos son más pequeños y tienen el pericarpio más delgado; por lo tanto acumulan menos materia seca; mientras que los tipos guajillo y ancho tienen menos frutos (38 frutos planta⁻¹) pero más largos, anchos y pesados (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010).

En el cultivo de chile las flores y los frutos son formados y cosechados continuamente mientras el crecimiento de algunas partes vegetativas continúa. Sin embargo, frutos creciendo simultáneamente en una planta puede cambiar críticamente la actividad de las fuentes de carbono y crear competencia entre estructuras vegetativas y reproductivas, por lo que pueden presentarse fluctuaciones en los índices de producción (Marcelis y Baan Hofman-Eijer, 1995; Heuvelink y Körner, 2001).

En esta investigación, de manera general, cuando ocurrió la máxima acumulación y estabilización de la biomasa de los órganos vegetativos (113 ddt), la planta se encontraba en plena floración e inicio de la fructificación, esto indicaría que ciertamente existe antagonismo entre el crecimiento de las estructuras reproductivas y el de las vegetativas, como en la mayoría de los cultivos (Taiz y Zeiger, 2010).

La máxima fructificación coincidió con el periodo de estabilización del área foliar, que podría considerarse como máxima, lo cual es relevante porque los frutos son una demanda importante de fotoasimilados (Ho, 1996) y esto garantiza que el tamaño de la fuente sea suficiente para proporcionar un adecuado suministro de fotoasimilados para estos y otros órganos en crecimiento (Peil y Galvez, 2005).

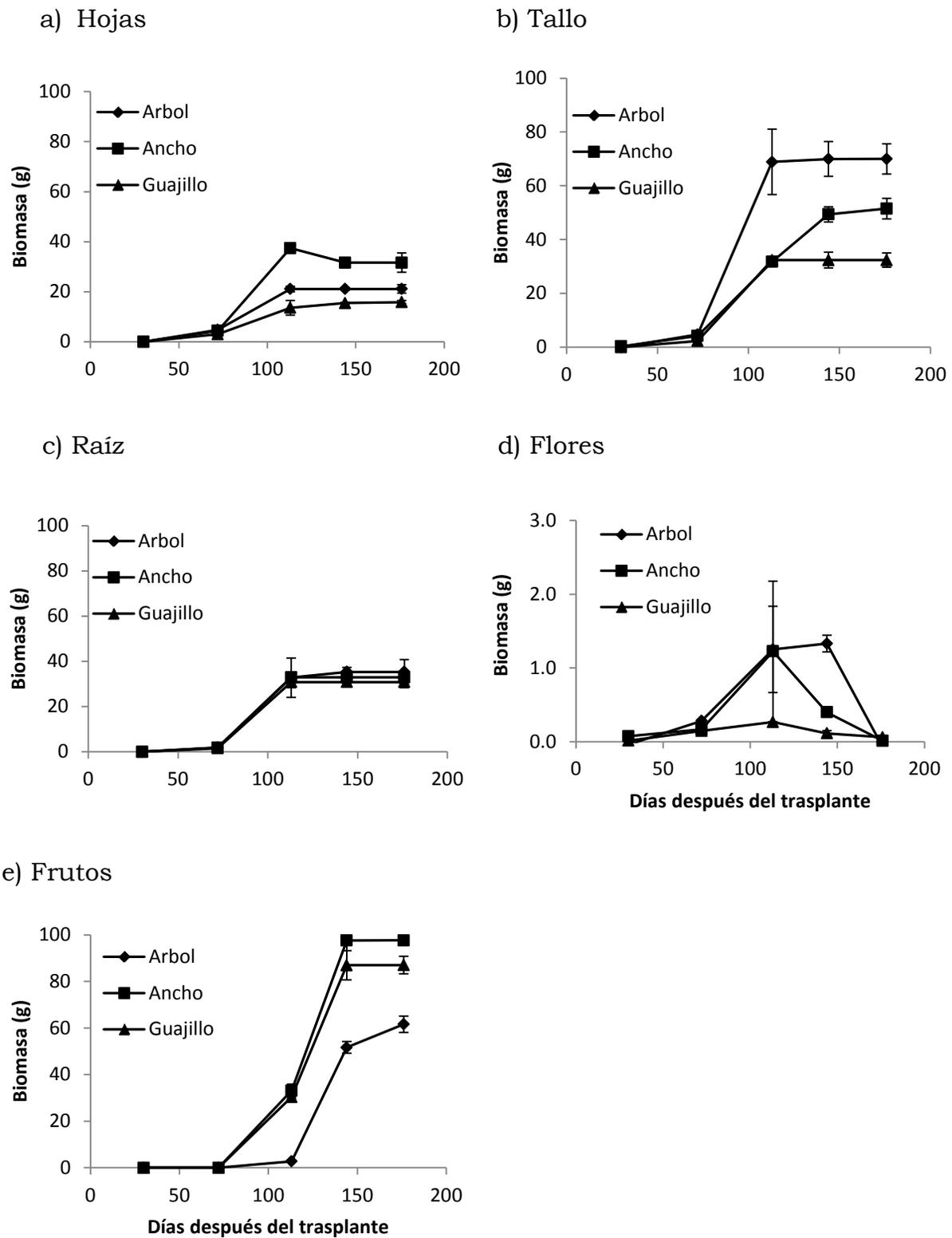


Figura 7. Cinética de la acumulación de biomasa de las diferentes estructuras de tres tipos de chile.

Modelos polinomiales para las estructuras de tres tipos de chile: 'De Árbol': hojas: $Y = 21.1012/(1 + 118784000 \cdot \exp(-0.241165t))$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 0.47$); tallo: $Y = 70.0069/(1+(t/85.8372)^* -14.9549)$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 0.97$); raíz: $Y = 35.3325/(1 + 253983 \cdot \exp(-0.132671t))$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 0.11$); flores: $Y = 1.18876 - 0.0703919t + 0.00110982t^2 - 0.00000426505t^3$ ($R^2 = 0.89$, $CV = 0.48$); frutos: $Y = 61.7394/(1 + 577128000 \cdot \exp(-26.6547t))$ ($R^2 = 1$, $CV = 0$). Para 'Ancho': hojas: $Y = 31.6133/(1+(t/74.7732)^* -48.598)$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 0.67$); tallo: $Y = 51.6476/(1 + \exp(9.97115-0.0879019*t))^{(1/1.46298)}$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 0.12$); raíz: $Y = 32.9168/(1 + 641578000000 \cdot \exp(-0.337921t))$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 0.77$); flores: $Y = (0.0511852-0.00028017t)/(1 - 0.015827t + 0.0000629954t^2)$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 0.08$); frutos: $Y = 97.6901/(1 + 31470400000000 \cdot \exp(-0.269144t))$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 3.77$). Para 'Guajillo': hojas: $Y = 15.9406/(1+(t/88.4569)^* -7.13306)$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 0.99$); tallo: $Y = 32.3571/(1 + 67973300000 \cdot \exp(-0.310665t))$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 0.59$); raíz: $Y = 30.8335/(1 + 927960000000 \cdot \exp(-0.341614t))$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 0.66$); flores: $Y = (-0.00149703+0.000272977t)/(1 -0.0197068t + 0.000104736t^2)$ ($R^2 = 0.88$, $CV = 0.07$); frutos: $Y = 87.0677/(1 + 1890130000000 \cdot \exp(-0.244656t))$ ($R^2 = 0.99$, $CV = 4.29$). "t" es días después del trasplante; "Y" es biomasa (g).

3.3.4 Distribución de la biomasa

La distribución de la biomasa está determinada por la ontogenia del cultivo, el genotipo, la presencia y calidad de la demanda, y la distancia entre fuentes y demandas (Taiz y Zeiger, 2010), de este modo, existen diferencias entre cultivares. Conocer esta distribución resulta importante porque permite crear relaciones que expliquen el comportamiento de la acumulación de biomasa o en el caso de órganos subterráneos y de almacenamiento conocer si un aparente incremento en la biomasa de la parte aérea es resultado de la ganancia fotosintética o simplemente de la redistribución de la biomasa desde el sistema radical (Roberts *et al.*, 1993).

En este estudio, a los 30 ddt se muestra que el crecimiento de los tres tipos de chile es similar pues en todos las hojas constituyen entre el 50 y 54 % de la materia seca total de la planta; el tallo concentra entre 27 y 28 % y la raíz entre 17 y 22 % (Figura 8).

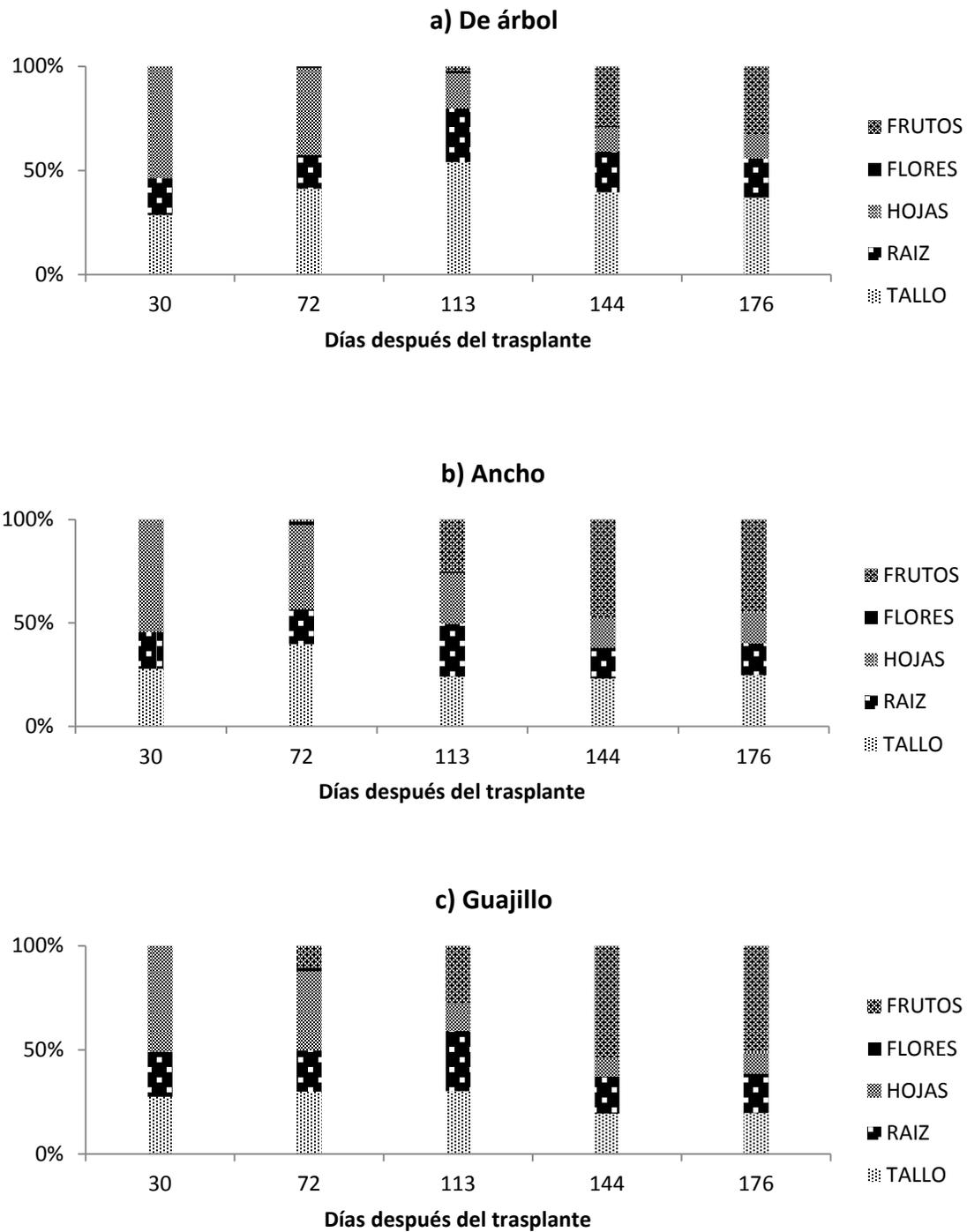


Figura 8. Distribución de biomasa en plantas de tres tipos de chile en cinco fechas durante su desarrollo.

A los 72 ddt ya hay presencia de estructuras reproductivas y, como se mencionó anteriormente, se inicia con el antagonismo que es más notorio a los 113 ddt, por ejemplo en el chile de árbol (Figura 8a) las hojas disminuyen su demanda directa pues ya no acumulan grandes cantidades de biomasa y muy probablemente desde entonces y hasta el final del ciclo se comportan como la fuente de fotoasimilados. A los 144 ddt se da paso a un crecimiento mayor de los frutos que conforman la principal demanda ya con un 28 % del total; la acumulación de materia seca es creciente en estos órganos hasta alcanzar 32 % a los 176 ddt. El tallo llega a constituir más del 50 % de la materia seca total a los 113 ddt debido a la ramificación y la altura. En este periodo la raíz alcanzó el mayor porcentaje aportado a la materia seca total con un 25.7 % y para el final del ciclo su porcentaje osciló en 17 %.

En los tipos ancho y guajillo las tendencias generales de distribución de materia seca son similares (Figuras 8b y 8c). Con las hojas parece ocurrir lo mismo que en chile de árbol, al inicio del ciclo son demanda y después actúan como fuente. Una de las diferencias entre tipos es que en el chile guajillo la acumulación de biomasa en frutos comenzó a ser significativa a partir de los 72 ddt alcanzando 54 % a los 144 ddt; en ancho fue a los 113 ddt con un máximo de 47 % y en árbol hasta los 144 ddt con valores de 32 %.

La relación entre el sistema radical y la parte aérea es muy importante durante todo el ciclo, al inicio la raíz se comporta especialmente como demanda pues es necesario su desarrollo para garantizar una fuerte absorción de nutrientes y mantener el crecimiento (Ayala-Garay *et al.*, 2011); durante el ciclo es importante mantener una relación que permita el crecimiento óptimo llegando a establecerse un equilibrio entre ambas secciones (Nielsen y Veierskov, 1988); la relación parte aérea/raíz se encontró en el orden de 4:1 en la mayoría de los muestreos, sólo a los 113 ddt, justo cuando se inicia con la mayor floración y la fructificación, la relación se establece 3:1 para después volver a 4:1. Para el final del ciclo, los porcentajes de materia seca de raíz de los

tres tipos de chile coinciden con lo reportado por Wien (1999) y Nuez *et al.* (2003).

Como en la mayoría de las hortalizas en las que el órgano de interés es el fruto, en Chile estos constituyen la mayor demanda (Azofeifa y Moreira, 2008); en este trabajo en los tipos de Chile ancho y guajillo estos alcanzaron porcentajes entre 45 y 50 % a los 144 ddt, muy cercano al reportado por Azofeifa y Moreira (2004) de 54 % en Chile tipo bell. En Chile de árbol se obtuvo un porcentaje final de 33 % pero al momento del último muestreo había aún muchos frutos en crecimiento.

3.3.5 Índices de eficiencia fisiológica y relaciones fuente-demanda

3.3.5.1 Tasa absoluta (TAC) y relativa de crecimiento (TRC)

La TAC, como indicador de la fuerza de la demanda (Ho *et al.*, 1989), mostró un máximo a los 92 ddt para los tres tipos de Chile con promedio de 2.7 g d^{-1} (Figura 9); posteriormente disminuyó, pero en el Chile ancho a los 128 días la TAC es superior a la de los otros dos debido quizá a la acumulación de materia seca en los frutos (Figura 7) que indicaría mayor eficiencia para atraer y acumular fotoasimilados (García y Guardiola, 2000; Taiz y Zeiger, 2010). A los 160 días prácticamente el crecimiento fue nulo en todos los tipos.

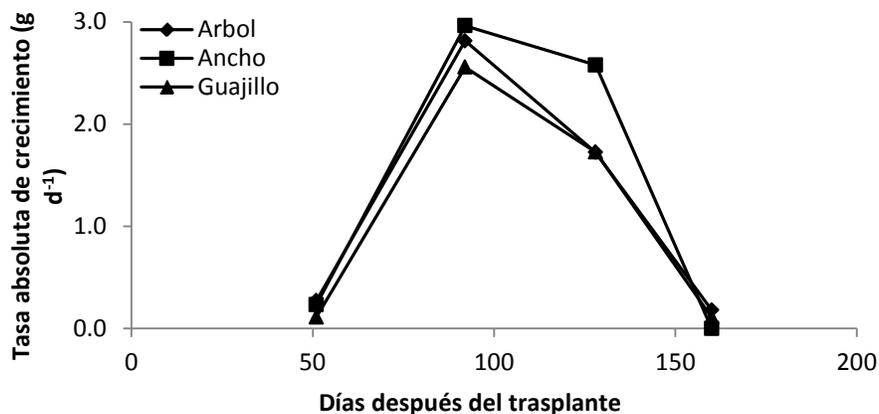


Figura 9. Tasa absoluta de crecimiento de plantas de tres tipos de Chile.

En contraste con la TAC, la TRC como medida de la actividad de la demanda (Ho *et al.*, 1989), tuvo su valor máximo al inicio del ciclo (51 ddt) con valores de $0.10 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ en el chile guajillo, $0.08 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ en el chile de árbol y $0.06 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ en el ancho (Figura 10) y disminuyó continuamente con la edad; pues durante la senescencia la planta presentó una velocidad de disminución del crecimiento (Hunt, 1990).

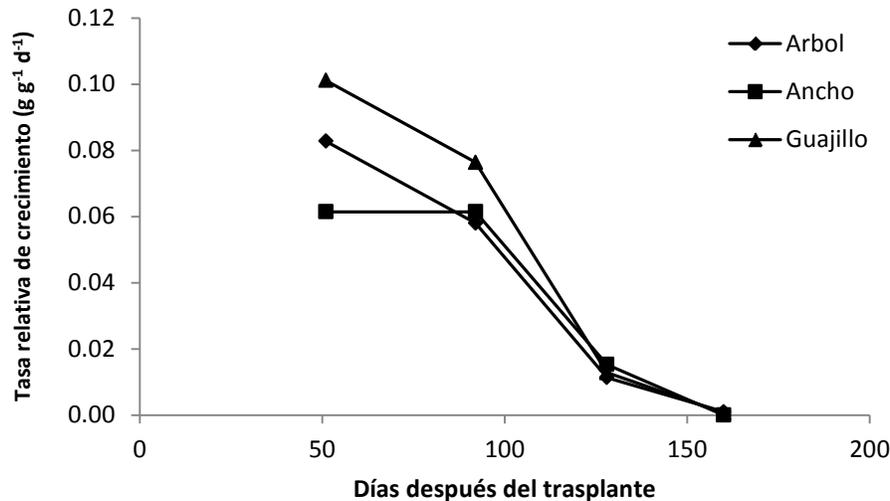


Figura 10. Tasa relativa de crecimiento en plantas de tres tipos de chile.

Los tres tipos de chile presentaron la misma tendencia en su TRC a pesar de tener diferentes periodos de mayor o menor crecimiento de sus estructuras; sin embargo, el chile guajillo en las primeras dos fechas de muestreo (51 y 92 ddt) superó a los otros tipos, lo que indicaría que quizá presenta mayor división celular. El chile ancho mantiene su valor de TRC inicial hasta los 92 ddt considerándose dicha estabilización como la misma cantidad de células en división en tejidos y órganos durante ambos periodos. Además se observa que en todos los tipos de chile el mayor decremento de la TRC se presentó entre los 92 y 128 ddt, lo que representaría que en este momento ya no existe división celular en zonas meristemáticas y que probablemente en este estado está ocurriendo la diferenciación.

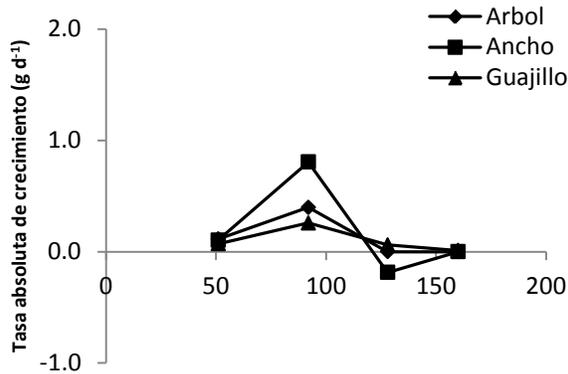
3.3.5.2 TAC y TRC de los órganos individuales

Las estructuras que ejercen la mayor demanda durante las primeras etapas del ciclo son las vegetativas: hojas, tallo y raíz que al igual que la planta completa alcanzaron su máxima TAC a los 92 ddt (Figuras 11a, 11b y 11c). La TAC decrece con la edad de la planta, disminución atribuible a la reducción proporcional de los tejidos meristemáticos. Sin embargo de los 92 a los 128 ddt ocurre el crecimiento acelerado de los frutos, y de hecho es hasta los 128 ddt que estos alcanzan su máxima TAC de 1.6 g d^{-1} en chile de árbol, 1.8 g d^{-1} en guajillo y 2.1 g d^{-1} en ancho (Figura 11e) lo que indica que los frutos del chile ancho tienen una mayor eficiencia para acumular biomasa.

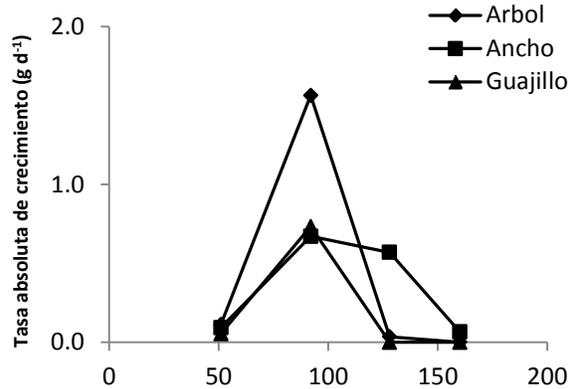
Diferencias entre tipos de chile son notorias en la demanda del tallo, pues el chile de árbol superó a los otros dos tipos al tener una TAC de más del doble (1.6 g d^{-1}) lo que podría deberse a que la planta tiene mayor altura y número de ramas (datos no mostrados) por lo que la demanda de fotoasimilados fue mayor. La tendencia seguida por la TAC del chile ancho fue diferente pues esta se mantuvo más o menos constante de los 92 a los 128 ddt (0.7 g d^{-1}) lo que significa que el crecimiento en tallos se mantiene y siguen siendo demanda mientras que en los otros tipos la demanda decrece (Figura 11b).

La TAC de raíces y frutos fueron similares en los tres tipos. No así en las hojas, donde el chile ancho a los 92 ddt presentó una TAC de 0.81 g d^{-1} mientras que en los otros tipos se mantuvo por abajo de 0.40 g d^{-1} ; de acuerdo con información anterior, el chile ancho produjo menor cantidad de hojas y su biomasa también fue menor que en chile de árbol, lo que indicaría que en ancho las hojas son más eficientes en la ganancia de peso que las del chile de árbol. En el muestreo siguiente la TAC en hojas de chile ancho se hizo negativa quizá por la gran fuerza de demanda ejercida por los frutos en este periodo. Para el último muestreo (150 ddt) la tendencia fue similar en los tres tipos.

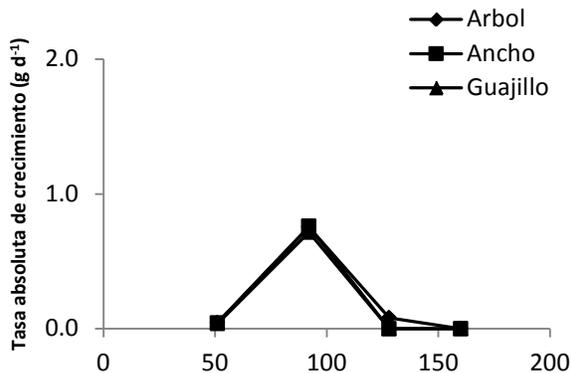
a) Hojas



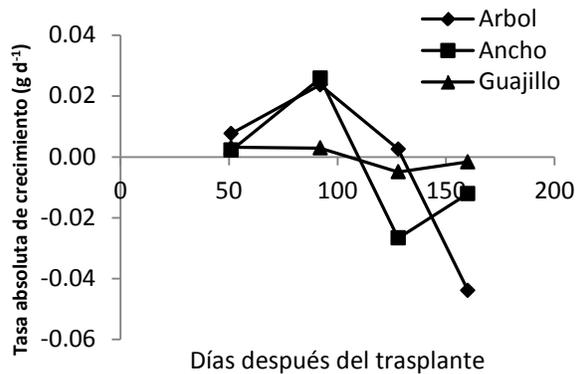
b) Tallo



c) Raíz



d) Flores



e) Frutos

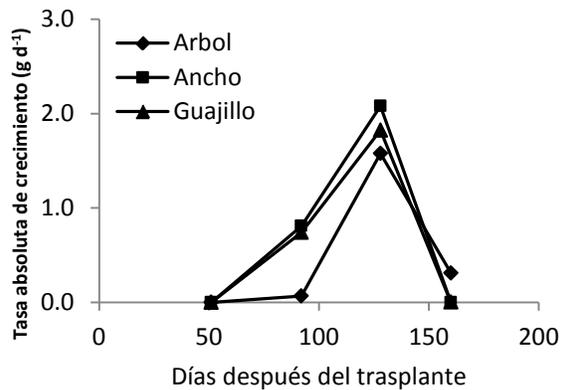


Figura 11. Tasa absoluta de crecimiento de los órganos de plantas de tres tipos de Chile.

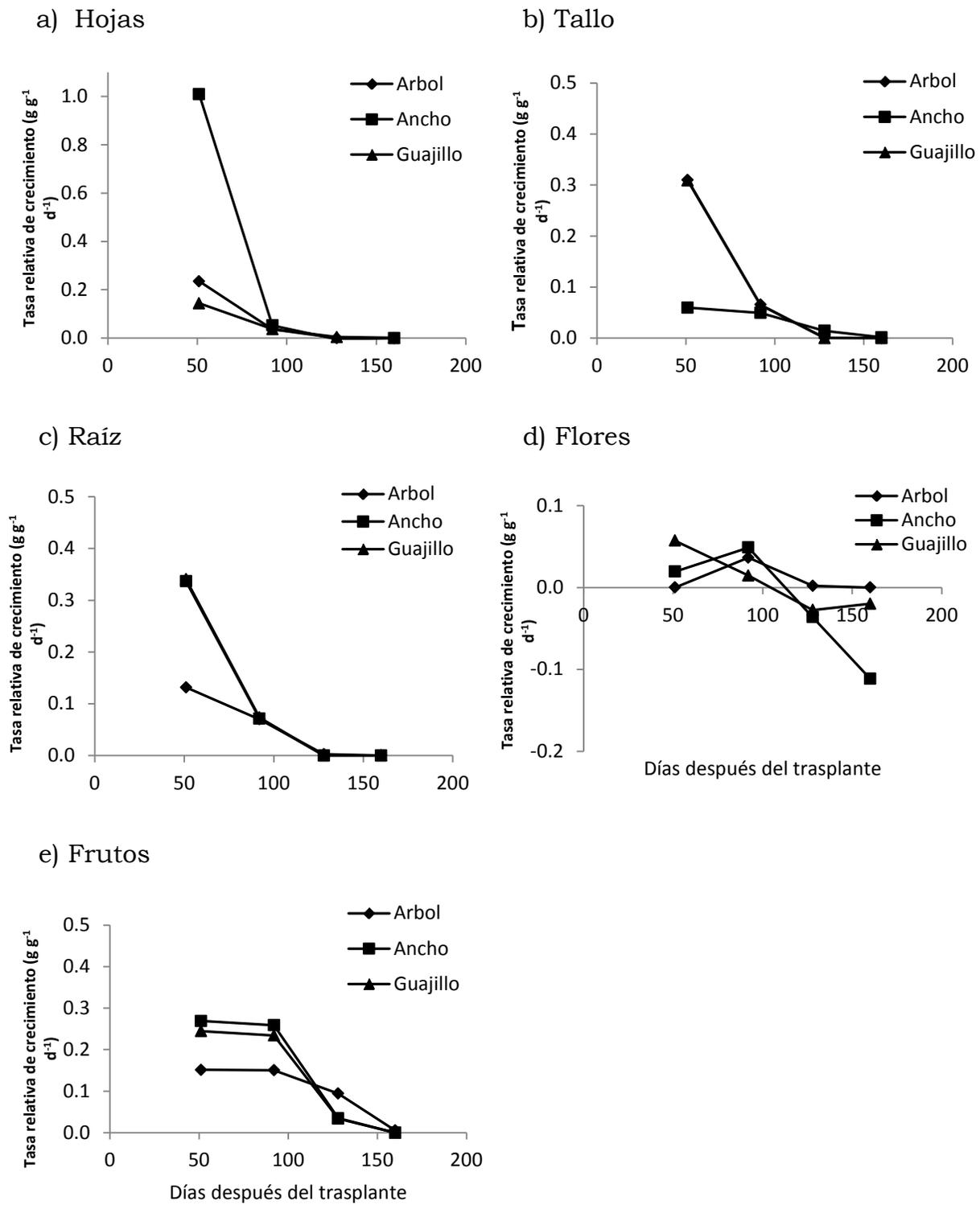


Figura 12. Tasa relativa de crecimiento de los órganos de plantas de tres tipos de Chile.

Respecto a la actividad de la demanda estimada por la TRC en los tres tipos de chile el tallo, la raíz y los frutos destacaron por tener la mayor demanda a los 51 ddt (Figuras 12b, 12c y 12e); a partir de aquí la actividad de demanda de tallos decreció rápidamente hasta valores mínimos; la raíz continuo actuando como demanda a los 92 ddt con una TRC de $0.07 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para después ser de 0 (128 ddt); mientras que los frutos fueron los órganos con mayor actividad a los 92 y 128 ddt (valores de TRC de 0.15 a $0.26 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ y 0.03 a $0.09 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ respectivamente) dejando de ser demanda activa para el final del ciclo (160 ddt).

Las hojas presentaron la mayor actividad a los 51 ddt (Figura 12a) en donde sobresale el chile ancho ($1.0 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$); cuando en guajillo se tuvo una TRC de $0.14 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ indicando tal vez que las hojas de chile ancho contribuyen al incremento de materia seca de esos mismos órganos. Mientras que en los otros tipos dicha aportación existe pero en menor proporción. Las flores presentan la mayor demanda en chile guajillo al inicio del ciclo y para los chiles ancho y de árbol a los 92 ddt (Figura 12d) pero con valores mínimos ($0.01\text{-}0.04 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$) y para muestreos posteriores no representan demanda pues los valores se convierten en negativos.

3.3.6 Fotosíntesis

La tasa de fotosíntesis neta fue ascendente durante los primeros dos muestreos (30 y 72 ddt) y fue a los 72 ddt cuando se obtuvo la máxima fotosíntesis para los tres tipos de chile con un promedio de $19 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en las hojas más jóvenes y de $15.5 \mu\text{moles de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en hojas con demanda directa para posteriormente reducirse hasta valores de 4.69 y $-0.60 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en el chile de árbol, 3.66 y $4.11 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en ancho y 9.13 y $4.04 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en guajillo en el último muestreo (Figura 13).

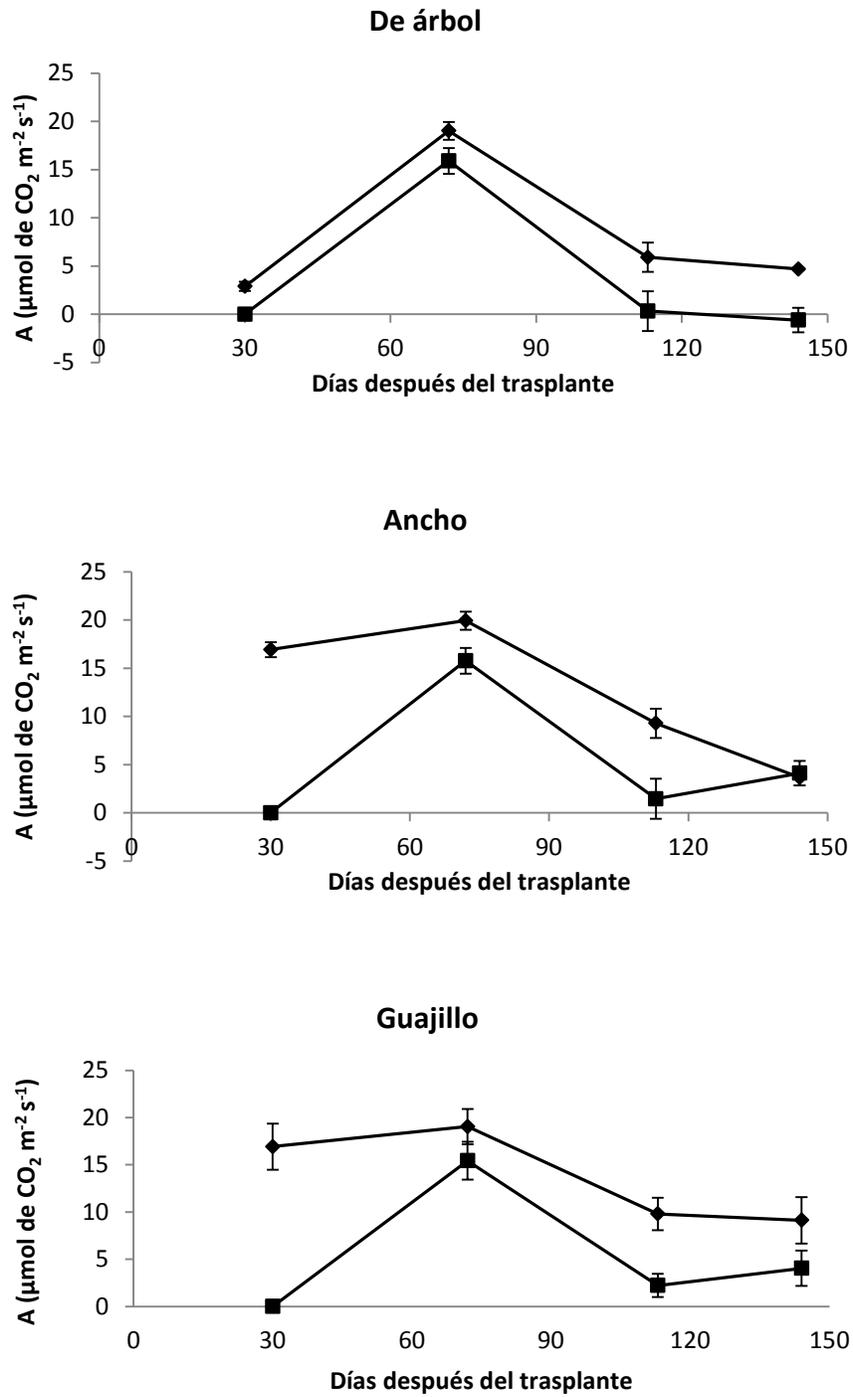


Figura 13. Tasa de fotosíntesis neta (A) en la hoja más joven (◆) y una hoja con demanda directa (■) en los tipos de chile de árbol, ancho y guajillo en cuatro etapas del ciclo.

A los 30 ddt la principal demanda la efectúan los órganos vegetativos incluidas las hojas que presentan un comportamiento fotosintético igual en los tipos ancho y guajillo con $16.92 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y en el chile de árbol de tan solo $2.88 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ valor que en parte se debe a la baja cantidad de luz incidente en las hojas ya que las variaciones en la intensidad de luz experimentada por las plantas pueden notablemente influenciar su actividad fotosintética (Jaimez, 2011) al alterar la estructura fotosintética (Osmond *et al.*, 1999; Murchie *et al.*, 2005).

A los 72 ddt se obtuvieron los valores más altos de fotosíntesis en las hojas de los tres tipos de chile, en este momento ya existe demanda por parte de órganos reproductivos, principalmente flores, que al parecer ocasionan que las hojas más cercanas a ellas reduzcan su capacidad fotosintética pues en todos los tipos de chile existió reducción de al menos 20 % en comparación con las hojas más jóvenes.

Se ha mencionado que la presencia de frutos en la planta causa un menor crecimiento del área foliar (Hall y Scurlock, 1993) pero incrementa la actividad fotosintética (Bhatt y Srinivasa-Rao, 1997); sin embargo en este trabajo a los 113 ddt se muestra un descenso significativo en la actividad fotosintética en las hojas con demanda directa (ahora ya fruto); los valores se ubican en $1.33 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ sin presentarse diferencias entre tipos; mientras que los valores se redujeron a 5.9, 9.2 y $9.7 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente para los tipos de árbol, ancho y guajillo en las hojas más jóvenes y con mayor exposición a la radiación.

Es importante mencionar que el comportamiento del área foliar (Figura 5) muestra una estabilización hasta este punto pudiendo pensarse que la planta compensa la baja fotosíntesis *per se* con la producción de muchas hojas para cubrir esta etapa considerada de alta demanda de fotoasimilados. Además, las hojas con demanda directa casi siempre se ubican en un estrato bajo por lo que la radiación incidente es más baja, provocando lo observado en hojas de C.

chinense Jacq., que en condiciones de sombra exhiben más bajo promedio diario y total de asimilación de índices de CO₂ comparado con aquellas expuestas totalmente al sol (Jaimez, 2011). Entonces la disminución de la fotosíntesis por cada hoja con demanda directa en la floración parece deberse a una menor cantidad de radiación incidente; sin embargo, la fotosíntesis total de la planta podría compensarse por la máxima área foliar.

En el último muestreo de fotosíntesis el chile guajillo conservó la capacidad fotosintética en las hojas más jóvenes 9.1 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ mientras que en de árbol y ancho se redujo a 4.6 y 3.6 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente, quizá por razones de senescencia. Sin embargo, aunque en el chile de árbol en hojas con demanda directa la fotosíntesis se comportó negativa, este tipo fue el que mayor producción de hojas tuvo por lo que esto colaboró en el apropiado suministro de fotoasimilados para cumplir con la demanda.

3.4 CONCLUSIONES

Bajo las condiciones en que se desarrollo esta investigación, las tendencias de producción de área foliar, acumulación de biomasa y distribución fueron similares para los tres tipos estudiados, no obstante se observaron diferencias morfológicas importantes entre los tipos evaluados; la altura y la ramificación, el tamaño y peso de los frutos y el tamaño y el número de hojas que está determinado genéticamente.

El área foliar fue mayor en el chile de árbol (hasta 0.41 $\text{m}^2 \text{ planta}^{-1}$) y menor en el chile ancho (0.16 $\text{m}^2 \text{ planta}^{-1}$); sin embargo, la capacidad fotosintética fue más eficiente en chile ancho al producir mayor cantidad de biomasa total

En los tres tipos, la fructificación tuvo efecto antagonista en el desarrollo ya que disminuyó el crecimiento de estructuras vegetativas mientras que se convirtieron en los principales órganos demandantes.

Los valores y tendencias de la fotosíntesis resultaron similares en ancho y guajillo para todos los muestreos, mientras que, de árbol al inicio del ciclo tuvo una fotosíntesis mucho menor en hojas jóvenes. Adicionalmente, se notó que las hojas con demanda directa desarrollan menor fotosíntesis que aquellas sin demanda.

3.5 LITERATURA CITADA

Aguiar, N. A. de O., R. J. Domingos, S. Zambelo de P. 2000. Growth analysis in the potato crop under different irrigation levels. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 35:901-907.

Aguilar-León, M. G., J. A. Carrillo-Salazar, A. Rivera-Peña y V. A. González-Hernández. 2006. Análisis de crecimiento y de relaciones fuente-demanda en dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 29(2):145-156.

Aguilar-Rincón, V. H.; T. Corona Torres; P. López López; L. Latournerie Moreno; M. Ramírez Meraz; H. Villalon Mendoza y J. A. Aguilar Castillo. 2010. Los Chiles de México y su Distribución. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, IT-Conkal, UANL, UAN. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 114 p.

Ayala-Garay, O. J., J. A. Carrillo-Salazar, E. Hernández-García, E. Díaz-Martínez, M. Livera-Muñoz y G. Almaguer-Vargas. 2011. Crecimiento de plántulas de estátice (*Limonium sinatum*) y viola (*Viola cornuta*) en ambientes contrastantes. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 17:57-78.

Azofeifa, A. y M. A. Moreira. 1998. Análisis de crecimiento del chile dulce (*Capsicum annuum* L.) cultivar UCR 589 en Alajuela, Costa Rica. *BOLTEC* 31(1):1-12. Shibles

- Azofeifa, A. y M. A. Moreira. 2004. Análisis de crecimiento del chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. cv. Hot), en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 28:57-67.
- Azofeifa, A. y M. A. Moreira. 2008. Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. cv. Hot) en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 32(1):19-29.
- Bhatt, R. M., and N. K. Srinivasa-Rao. 1997. Growth and photosynthesis in bell pepper as affected by sink manipulation. *Biologia Plantarum* 39(3):437-439.
- García, L. A. y J. L. Guardiola. 2000. Transporte en el floema. *In: Azcon-Bieto, J. y M. Talon. (eds.). Fundamentos de Fisiología Vegetal. Mc.Graw-Hill interamericana. Barcelona, España. pp: 65-82.*
- Gastiazoro, T. 2000. Fenología Agrícola. Facultad de Ciencias Agrarias. U. N. C. Argentina.
- González-Real, M. M., A. Baille and H. Q. Liu. Influence of fruit load on dry matter and N-distribution in sweet pepper plants. *Scientia Horticulturae* 117:307-315.
- Hall, D. O., and J. M. O. Scurlock. 1993. Apendix C: Biomass production and data. *In: Photosynthesis and Production in a Changing Environment: a Field and Laboratory Manual. Hall, D. O., J. M. O. Scurlock, H. R. Bolhar-Nordenkamp, R. C. Leegood, and S. P. Long (eds.). Chapman & Hall. London, England. pp: 425-444.*
- Heuvelink, E. and O. Körner. 2001. Parthenocarpic fruit growth reduces yield fluctuation and blossom-end rot in sweet pepper. *Annals of Botany* 88:69-74.

- Ho, L. C. 1996. The mechanism of assimilate partitioning and carbohydrate compartmentation in fruit in relation to the quality and yield of tomato. *Journal of Experimental Botany* 47:1239-1243.
- Hunt, R. 1990. *Basic Growth Analysis: Plant Growth Analysis*. Unwin Hyman, London, Great Britain. 112 p.
- Hunt, R., D. R. Causton, B. Shipley and A. P. Askew. 2002. A modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of Botany* 90:485-488.
- Jaimez, R. E. 2011. Gas exchange in sweet pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) under different light conditions. *Journal of Agricultural Science* 3(3):134-142.
- Kleinkopf, G. E., D. T. Westermann and R. B. Dwelle. 1981. Dry matter production and nitrogen utilization by six potato cultivars. *Agronomy Journal* 73:799-802. Beadle
- Laborde, J. A. y O. Pozo. 1984. *Presente y Pasado del Chile en México*. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (SARH-INIA) Publicación Especial No. 85. México. 80 p.
- Marcelis, L. F. M. and L. R. Baan-Hofman-Eijer. 1995. Growth analysis of sweet pepper fruits (*Capsicum annuum* L.). *Acta Horticulturae* 412:470-478.
- Maroto, B. J. V. 2002. *Horticultura Herbácea Especial*. 5ª Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 702 p.
- Mora, A., R., J. Ortiz C., A. Rivera P., M. C. Mendoza C., Ma. T. Colinas L. y H. Lozoya S. 2006. Índices de eficiencia de genotipos de papa establecidos en condiciones de secano. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 12(1):85-94.

- Murchie, E. H., S. Hubbart, S. Peng and P. Horton. 2005. Acclimation of photosynthesis to high irradiance in rice, gene expression and interaction with leaf development. *Journal of Experimental Botany* 56:449-460.
- Nielsen, T. H. and B. Veierskov. 1988. Distribution of dry matter in sweet pepper plants (*Capsicum annuum* L.) during the juvenile and generative growth phases. *Scientia Horticulturae* 35:179-187.
- Nuez, F., R. Gil Ortega y J. Costa. 2003. *El Cultivo de Pimientos, Chiles y Ajíes*. Ediciones Mundi-Prensa Madrid-España. 586 p.
- Osmond, C. B., J. M. Anderson, M. C. Ban and J. C. Egerton. 1999. Compromising efficiency, the molecular ecology of light resource utilization in terrestrial plants. *In: Advances in physiological plant ecology* (eds.) M. C. Press, J. D. Scholes, M. G. Baker, pp: 1-24. Oxford, Blackwell Science.
- Peil, R. M. y J. L. Gálvez. 2005. Reparto de materia seca como factor determinante de la producción de hortalizas de frutos cultivadas en invernadero. *Revista Brasileira de Agrociencia* 11:05-11
- Roberts, M. J., S. P. Long, L. L. Tieszen, and C. L. Beadle. 1993. Measurement of plant biomass and net primary production of herbaceous vegetation. *In: Photosynthesis and Production in a Changing Environment: a Field and Laboratory Manual*. Hall, D. O., J. M. O. Scurlock, H. R. Bolhar-Nordenkamp, R. C. Leegood, and S. P. Long (eds.). Chapman & Hall. London, England. pp: 1-21.
- Salazar, M. R., J. W. Jones, B. Chaves and A. Cooman. 2008. A model for the potential production and dry matter distribution of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) *Scientia Horticulturae* 115:142-148.

- Schoch, P. G. 1972. Effects of shading on structural characteristics of leaf and yield of fruit in *Capsicum annuum* L. Journal of the American Society for Horticultural Science 97:461-464.
- Sedano-Castro, G., V. A. González-Hernández, E. M. Engleman, C. Villanueva-Verduzco. 2005. Dinámica del crecimiento y eficiencia fisiológica de la planta de calabacita. Revista Chapingo. Serie Horticultura 11(2):291-297.
- Taiz L. and E. Zeiger. 2010. Plant Physiology. 5th Ed. Sinauer Associates, Inc., Publishers. Sunderland, Massachusetts. 764 p.
- Wien, H. C. 1999. Peppers. *In: The Physiology of Vegetable Crops*. Wien, H. C. (ed.). CABI Publishing. Wallingford, UK. pp: 259-293.

IV. EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DE SEMILLA DE *Capsicum annuum* L. EN CINCO ETAPAS DE DESARROLLO

4.1 INTRODUCCIÓN

El chile (*Capsicum* sp.) se cultiva desde tiempos precolombinos y formó parte de la dieta de varias culturas americanas (Long-Solis, 1986). En México, este fruto es una de las hortalizas más importantes debido al consumo popular y la magnitud de la producción.

Existen cinco especies cultivadas de chile (Nuez *et al.*, 2003). De éstas, por la extensión de su cultivo y el valor económico que representa su producción, *C. annuum* L. es la más importante, y es en México donde se encuentra la mayor diversidad (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010), representada en orden de importancia por los tipos: serrano, jalapeño, ancho, pasilla, bell, guajillo, de árbol, entre otros (SIAP, 2011); los cuales contrastan en forma, color, olor, sabor, y pungencia de los frutos.

La semilla es la unidad de diseminación y reproducción sexual de las plantas superiores y el material de propagación de la mayoría de los cultivos (Bradford, 2004).

Para la producción de un cultivo rentable es necesario utilizar semilla de alta calidad; pues tiene mayor probabilidad de éxito durante el establecimiento de la plántula (Wurr y Fellows, 1983; Bino *et al.*, 1998). Además, semillas de alta calidad mantienen mayor viabilidad durante el almacenamiento (Doijode, 2001).

La calidad de semilla comprende aspectos genéticos, fitosanitarios, físicos y fisiológicos; en estos últimos se incluyen la viabilidad, la capacidad germinativa, y el vigor; que se ven afectados por las condiciones de crecimiento de la planta madre durante el desarrollo de la semilla, el grado de madurez de

ésta al momento de la cosecha, la forma de cosechar y las condiciones de beneficio (Doijode, 2001; Bradford, 2004).

El desarrollo de las semillas se puede dividir en tres fases: histodiferenciación, acumulación de reservas y adquisición de tolerancia a la desecación (Taiz y Zeiger, 2010). La madurez fisiológica es la etapa fenológica en la que la semilla alcanza su máximo peso seco que representa el fin del periodo de acumulación; cuando ocurre la máxima germinación y vigor. A partir de esta etapa comienza el deterioro de las semillas (Copeland and McDonald, 2001). En algunas especies, la madurez de la semilla coincide con la madurez del fruto, de este modo, frutos cosechados tempranamente proporcionan semillas de baja calidad (Bradford, 2004).

Edwards y Sundstrom (1987) consideran que hay correlación entre la madurez del fruto de chile y la semilla y que la alta calidad de ésta se obtiene cuando el fruto ha cambiado totalmente de color. Esto fue encontrado en pimiento por Valdés *et al.* (1992), quienes obtuvieron los más altos porcentajes de germinación en semillas extraídas de frutos cosechados completamente rojos (maduros). Randle y Honma (1981) mencionan que las semillas de chile completan su madurez fisiológica una vez que los frutos cosechados pasaron por un periodo de reposo que varía de una a seis semanas según el tipo de chile. Por lo anterior, se considera que el grado de madurez de la semilla al momento de la cosecha y el tiempo de reposo post cosecha afectan la calidad tal como lo reportaron Vidigal *et al.* (2009).

De manera empírica se sabe que en chiles tipo serrano y ancho es posible obtener semillas viables de frutos en estado inmaduro (próximos a cambio de color); no obstante, la extracción generalmente se realiza cuando el fruto está seco. Extraer la semilla después de que los frutos maduran, es decir, dejarlos en el campo hasta su secado o colocarlos en cámaras de deshidratación requiere de tiempo e infraestructura y además la semilla queda expuesta a factores adversos y que pudieran causar la pérdida de su calidad.

Por otro lado, la posibilidad de obtener semillas en menor tiempo puede ser útil en programas de mejoramiento genético (Mora *et al.*, 1990), pues mediante la utilización de semilla extraída de frutos “inmaduros” se aceleraría el ciclo de selección y puede obtenerse germoplasma mejorado en periodos más cortos.

Los objetivos del presente estudio fueron evaluar las características de calidad de semillas de tres tipos de chile cosechados en cinco etapas de desarrollo del fruto con extracción inmediata y 15 días después de la cosecha y determinar la etapa más apropiada para obtener semillas con mayor calidad.

4.2 MATERIALES Y MÉTODOS

En Montecillo, Edo. de México (a 40 km de la Ciudad de México), se sembraron 60 semillas de tres tipos de chile: ancho (CP-667) colectado en 2005 en San Martín Texmelucan, Puebla; de árbol (CP-1037) obtenido en 2007 de Yahualica, Jalisco, y guajillo (CP-1112) originario de Ojo Caliente, Zacatecas (2009). Las poblaciones de chile provinieron del banco de germoplasma del Colegio de Postgraduados, México.

La siembra fue en charolas de unicel de 200 cavidades con sustrato estéril dentro de un invernadero con cubierta de polietileno el 25 de marzo de 2010. Dos semanas después de la emergencia se fertilizó con fertiguano (1 mL L^{-1}) dos veces por semana hasta el trasplante que se realizó el 25 de mayo en bolsas de polietileno negras 30 x 30 cm. Se usó tierra negra con hojarasca y peat moss 2:1:1 como sustrato. En esta fase se aplicaron tres riegos cada semana y dos fertilizaciones con triple 18 aplicado al sustrato (2 g L^{-1}); más aplicaciones quincenales de Bayfolan Forte (2 mL L^{-1}); y al inicio de la floración con NutriCalcio (2 mL L^{-1}) cada dos semanas.

A partir de la floración (cuando el 50% de las plantas de cada tipo de chile tenían al menos una flor con las anteras expuestas), diariamente, al medio día, se etiquetaron las flores que estuvieran en antesis. Posteriormente, se

cosecharon 30 frutos de cada tipo en cada una de las siguientes cinco etapas: (E1) 25 y (E2) 40 días después de anthesis (dda), (E3) cuando el 80 % de los frutos presentes comenzaron a cambiar de color verde a rojo (60 dda para chile ancho y árbol y 70 dda para guajillo), (E4) cuando el 80 % de los frutos cambiaron totalmente de color (75 dda para los tipos ancho y árbol y 90 dda para guajillo) y (E5) cuando el 80 % de los frutos estuvieron totalmente secos (120 dda); previo a esta etapa, las plantas estuvieron expuestas a dos heladas de (-3 °C) que se presentaron a los 106 dda para chile de árbol y 115 dda de los tipos ancho y guajillo. A quince de estos frutos se les extrajo la semilla inmediatamente y al resto 15 días después de almacenados en condiciones de $18 \pm 1^\circ\text{C}$.

La extracción de la semilla fue manual. Las semillas se lavaron con agua corriente durante un minuto y se dejaron secar sobre toallas de papel durante 24 horas a 20 °C, se colocaron en sobres de papel y se almacenaron dos meses a temperatura de $18 \pm 2^\circ\text{C}$.

Las variables fueron:

Contenido de humedad (CH, %). Una muestra de 0.5 g de semilla se secó en una estufa a 103°C durante 17 ± 1 h y se aplicó la fórmula de ISTA (2004).

Peso de 1000 semillas (PS, g). Se pesaron ocho repeticiones de 50 semillas en una balanza OHAUS, modelo Adventures y se calculó el peso correspondiente a 1000 semillas (ISTA, 2004).

Peso Volumétrico (PV, kg HL). Se usó una probeta de 10 ml, en la que se depositaron 0.5 g de semilla pesada en una balanza OHAUS, modelo 300 (ISTA, 2004).

Prueba de Germinación Estándar (PG, %) y Velocidad de Germinación (VG). La prueba se condujo en un cuarto de germinación a $25 \pm 1^\circ\text{C}$, con luz constante; se emplearon cuatro repeticiones de 25 semillas tratadas con fungicida Captan 2 g L⁻¹ colocadas en una capa de papel filtro Whatman No. 2

humedecido con 4.5 ml de KNO_3 (Técnica Química S. A.) al 2 %, en cajas Petri. Diariamente se contabilizaron las semillas germinadas (con protrusión de la radícula) hasta los 21 días, lo que permitió observar la cinética de la germinación. Con el total de semillas germinadas se calculó el porcentaje de germinación. La Velocidad de Germinación (VG) se calculó con la fórmula de ISTA (2004).

Los análisis estadísticos se efectuaron con el Statistical Analysis System versión 9.0 (SAS, 2002). Las variables se analizaron con base en un diseño experimental completamente al azar en arreglo factorial $3 \times 5 \times 2$, correspondiente a los tres tipos de chile, las cinco etapas de desarrollo del fruto y los dos tiempos de extracción. Se aplicó la transformación de la raíz cuadrada del arco seno de las variables que se registraron en porcentaje antes de efectuar su análisis.

4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La floración ocurrió a los 45 días después del trasplante (ddt) en los chiles ancho y guajillo y a los 54 ddt en el chile de árbol.

En general, las semillas de los tres tipos de chile en todas las etapas tuvieron un contenido de humedad del 7.6 % al momento de las pruebas, este porcentaje está dentro del rango para considerar a una semilla viva (Copeland y McDonald, 2001).

Las fuentes de variación resultaron significativas en todas las variables, excepto en el efecto de la extracción (E) sobre el peso volumétrico (PV) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Grados de libertad (GL), cuadrados medios y significancia estadística en los análisis de la varianza.

FV	GL	PS (g)		PV (Kg HL ⁻¹)		PG (%)		VG	
Tipo (T)	2	106.35	**	137.42	**	994.29	**	2.07	**
Etapas (D)	4	470.00	**	2255.97	**	27161.15	**	34.84	**
T*D	8	2190.48	**	699.57	**	8480.51	**	10.97	**
Extracción (E)	1	4.26	**	9.08	NS	12568.68	**	25.85	**
T*E	2	218.80	**	59.89	**	3252.58	**	6.58	**
D*E	4	210.17	**	1017.79	**	14976.75	**	21.29	**
T*D*E	8	76.11	**	343.94	**	5165.30	**	7.35	**
C.V. (%)		3		4		17		19	
R ²		0.99		0.99		0.97		0.97	

** = Significativo; NS = No Significativo; PS = Peso de 1000 semillas; PV = Peso volumétrico; PG = Porcentaje de germinación; VG = Velocidad de germinación.

El desarrollo de la semilla se divide en tres etapas, durante éstas su calidad evoluciona hasta alcanzar un punto máximo en la madurez fisiológica; después se inicia el deterioro (Bradford, 2004), aunque en este estudio no existió una prueba que permitiera diferenciarlas adecuadamente, se puede inferir que al no existir una gran cantidad de biomasa en la semilla (respecto al total alcanzado) de E1 (25 dda) las semillas se encontrarían en la etapa de histodiferenciación y/o inicio de la acumulación de reservas, dicha acumulación se daría en grandes cantidades hasta etapas posteriores (E2 y E3) en donde el peso y la calidad fisiológica de las semillas incrementaron exponencialmente hasta alcanzar un máximo para algunas variables y tipos de chile en la etapa E4 y en otras hasta E5 (Figura 14).

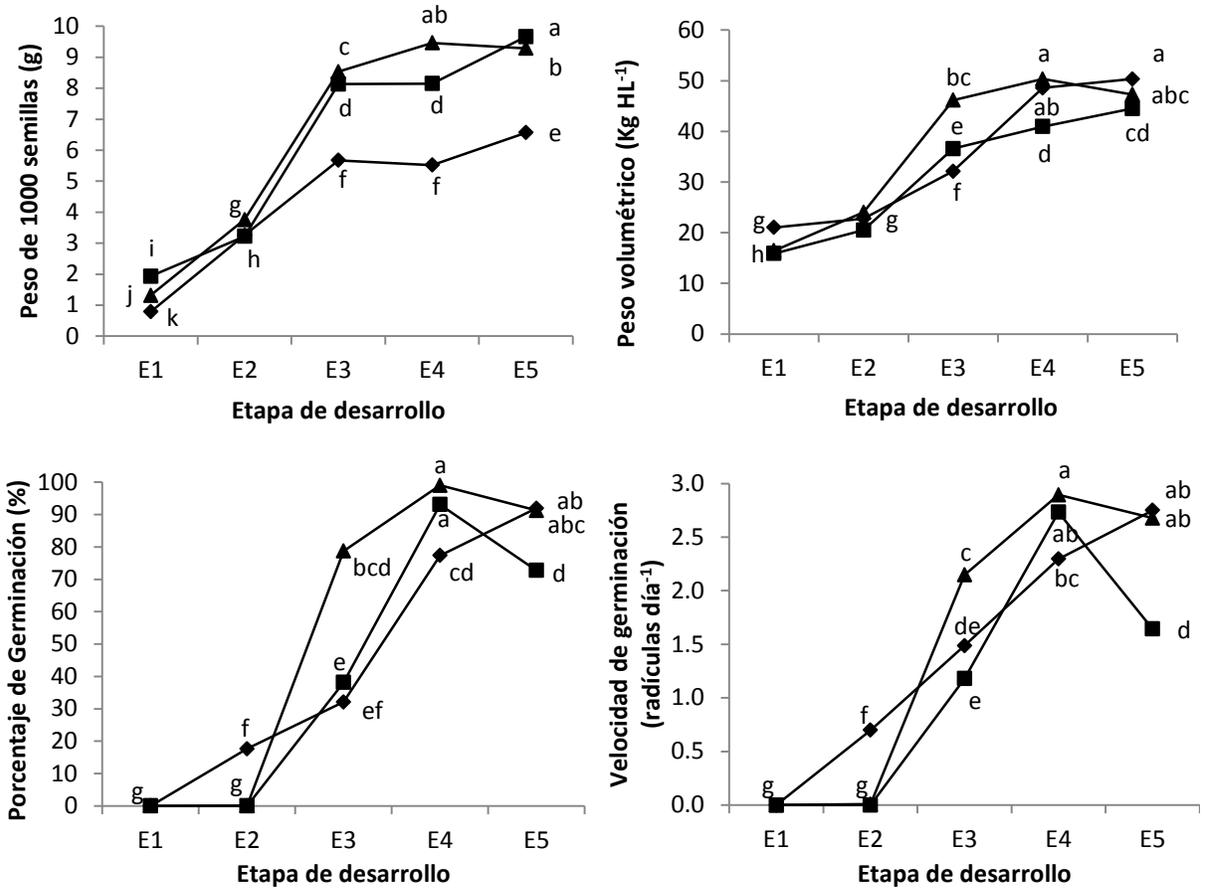


Figura 14. Evolución de la calidad de semillas de tres tipos de chile (de árbol \blacklozenge , ancho \blacksquare y guajillo \blacktriangle) cosechadas en cinco etapas de desarrollo. Misma letra dentro de cada variable indica no diferencias estadísticas (Tukey, 0.05). E1 = 25 días después de anthesis (dda); E2 = 40 dda; E3 = Fruto con 50 % de cambio de color; E4 = Cambio total del color del fruto; E5 = Fruto seco.

Las semillas cosechadas 25 y 40 dda (etapas E1 y E2) eran semillas inmaduras, quizá en etapa de acumulación de reservas, o al menos en E2, donde aún no alcanzaban el desarrollo morfológico y fisiológico que permitiera una germinación adecuada (Kermode, 1995). El chile de árbol fue el único tipo que presentó germinación (17.6 %) en semillas cosechadas en E2, lo que significa que un porcentaje de embriones tenían la capacidad de germinar; incluso antes de la acumulación del máximo peso. Sin embargo, no puede considerarse una etapa óptima de cosecha porque el mayor porcentaje de las

semillas no habían completado su madurez. Además, es muy probable que aún no adquirirían la tolerancia a la deshidratación que es un componente adicional de la calidad que favorece el mantenimiento de la longevidad durante el almacenamiento y se desarrolla subsecuentemente (Doijode, 2001).

No obstante la baja calidad fisiológica, en estas dos etapas, embriones obtenidos de estas semillas podrían completar su desarrollo en condiciones controladas *in vitro* con el fin de obtener plántulas viables (Perez-Torenero y Porras, 2008). Esta metodología favorecería utilizar estos embriones para la obtención de plantas híbridas maduras de híbridos interespecíficos cuando se ha presentado una condición que interrumpa el ciclo del cultivo obligando a una cosecha prematura (Buitendijk *et al.*, 1995).

En todos los tipos de chile, la calidad fisiológica (PG y VG) mejoró cuando las semillas se cosecharon durante la madurez del fruto (E4). La máxima calidad en chiles ancho y guajillo se obtuvo en esta etapa y se mantuvo durante E5 sólo para guajillo; mientras que, en chile de árbol la máxima se alcanzó hasta E5. Resultados similares fueron reportados por Sayed y Essam (1952), Edwards y Sundstrom (1987) y Valdés *et al.* (1992) en Chile.

La etapa de maduración de la semilla es una característica que está directamente relacionada con el vigor, definido como la suma total de las propiedades de la semilla que determinan el nivel potencial de actividad y desarrollo durante la germinación y emergencia de la plántula en condiciones adversas (Copeland y McDonald, 2001; ISTA, 2004); por tanto las semillas maduras extraídas en la etapa cuatro y cinco fueron las más vigorosas a excepción del chile ancho en la etapa 5 que pudieran atribuirse a daños por la exposición a temperaturas congelantes causadas por las heladas presentadas durante esta etapa.

En este contexto, el chile ancho fue el único afectado en el porcentaje de germinación y el vigor con reducciones de más del 20 y 30 % respectivamente

(Figura 14); los otros tipos no presentaron cambios en estas variables e incluso las semillas de chile de árbol, como ya se mencionó, presentaron la mayor calidad hasta la E5. Por lo anterior, muy probablemente, éste tipo de chile sería más resistente a este factor adverso.

La interacción entre el tipo de chile y tiempo de extracción (Figura 15) muestra que extraer las semillas del fruto 15 días después de la cosecha incrementó de manera general los valores de las variables PG y VG y en algunos casos de PS y PV.

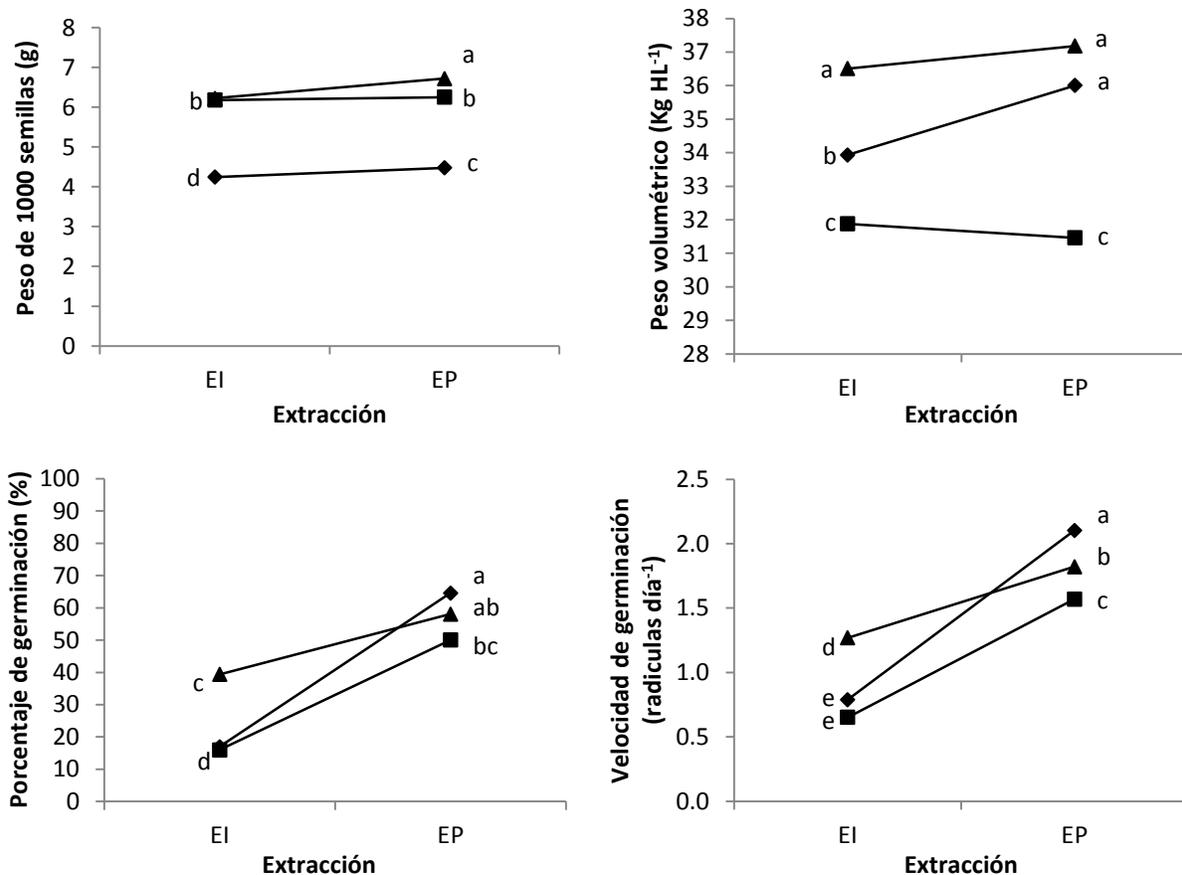


Figura 15. Calidad de semillas de tres tipos de chile (de árbol ◆ , ancho ■ y guajillo ▲) extraídas inmediatamente después de la cosecha (EI) y después de 15 días dentro del fruto (EP). Misma letra dentro de cada variable indica no diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

En la calidad física (peso de 1000 semillas y peso volumétrico), las diferencias entre etapas de extracción sólo fueron significativas para los chiles de árbol y guajillo en la variable peso de 1000 semillas; mientras que el chile de árbol fue el único que mostró diferencias en el peso volumétrico; esto se debe a que seguramente después de la cosecha del fruto éstas continuaron recibiendo sustancias de éste que almacenan y utilizarán posteriormente (Salisbury y Ross, 1994). Este hecho coincide con reportes de incrementos de la biomasa de la semilla de frutos carnosos (con pericarpio turgente) debidos a la transferencia de nutrientes desde estos durante el almacenamiento como lo observaron Dias *et al.* (2006) en tomate; sin embargo, en chile bell Sánchez *et al.*, (1993) no reportaron diferencias entre las semillas extraídas de frutos frescos y almacenados, tal como sucedió con el chile ancho en esta investigación. De manera general, en cuanto a la carnosidad el chile ancho tiene cierta similitud a la del chile bell, esto permitiría pensar que esta característica tendría influencia en la transferencia de nutrientes puesto la carnosidad entre los tipos guajillo y de árbol es también similar y en ellos si hubo transferencia de nutrientes hacia la semilla. Esto indica que no todos los frutos carnosos transfirieren nutrientes a las semillas después de la cosecha y que al encontrarse diferencias entre miembros de la especie *C. annuum*, ésta es una cualidad exclusiva de algunos tipos.

La acción conjunta de las etapas de desarrollo y los tiempos de extracción (Figura 16) indica que la influencia de estos últimos fue significativa durante E2 y E3 y nula en E4 y E5 para las variables peso de 1000 semillas y peso volumétrico; de lo que se concluye que cuando una semilla aún no ha acumulado su máxima biomasa (lo que ocurre durante su madurez fisiológica), es decir que se encuentran en la etapa de histodiferenciación o acumulación de reservas y el fruto es cosechado, ésta podría aun recibir asimilados por parte de éste que incrementen su biomasa.

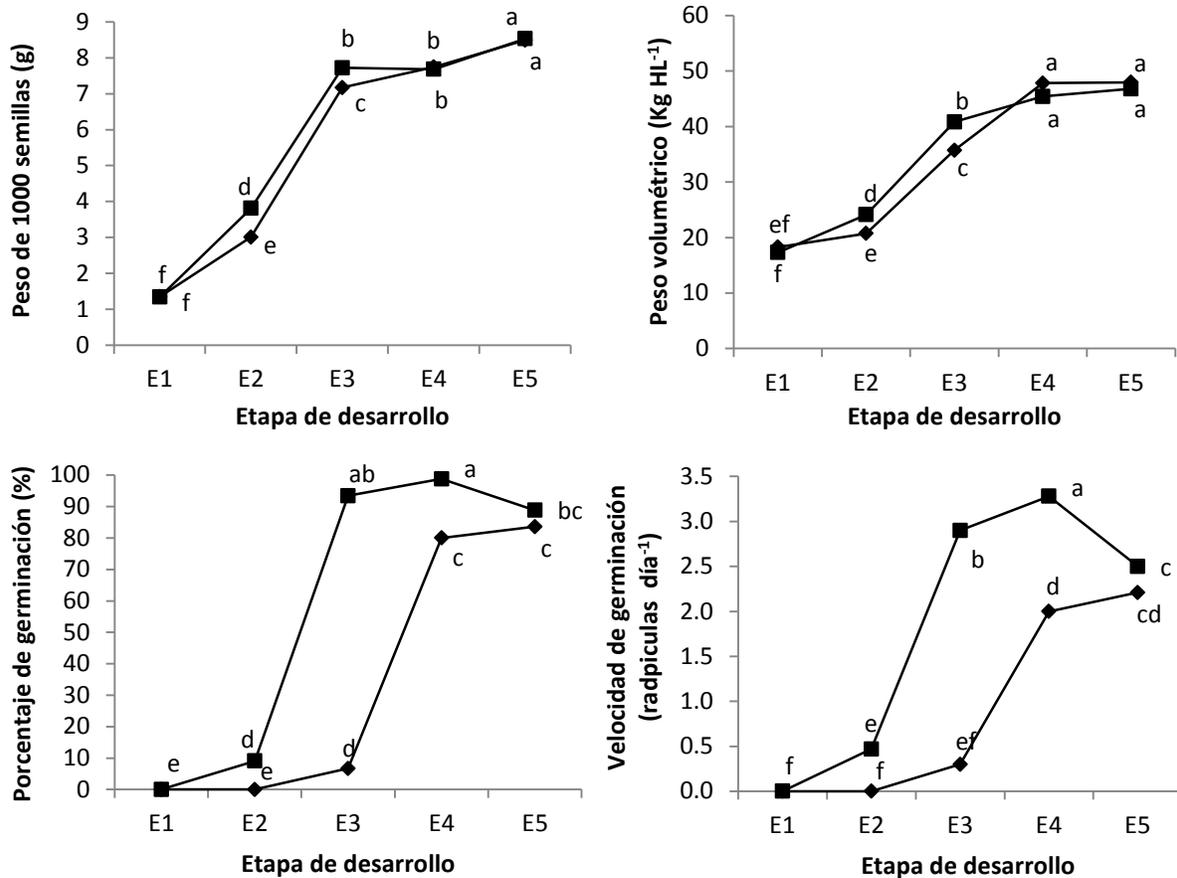


Figura 16. Evolución de la calidad de semillas de chile cosechadas en cinco etapas de desarrollo y extraídas inmediatamente después de la cosecha (EI, \blacklozenge) y después de 15 días dentro del fruto (EP, \blacksquare). Misma letra dentro de cada variable indica no diferencias estadísticas (Tukey, 0.05). E1 = 25 días después de anthesis (dda); E2 = 40 dda; E3 = Fruto con 50% de cambio de color; E4 = Cambio total del color del fruto; E5 = Fruto seco.

En el presente experimento la mejor calidad fisiológica se obtuvo con el tratamiento de fruto maduro con extracción posterior (E4, EP); pero a partir de la etapa de inicio de cambio de color del fruto con extracción posterior (E3, EP) fue posible obtener semillas con germinación uniforme y vigorosa que podrían ser la fuente tanto en experimentos de mejoramiento genético reduciendo la duración del ciclo de selección y como durante la producción de semilla

comercial, pues se garantiza una mayor calidad de la semilla obtenida en menor tiempo.

El factor común para el incremento de la germinación en la mayoría de los tratamientos fue la etapa de extracción (EP) que mejora esta variable; por ejemplo en E3 en más del 100 % (Figura 3); y es que la madurez de la semilla en algunas plantas está ligada a la senescencia, donde ocurre una transformación de tejidos. Es posible que al extraer las semillas sin haber concluido esta transformación se dañen procesos fisiológicos (Bradford, 2004); de este modo la permanencia de las semillas dentro del fruto después de la cosecha, en este caso 15 días, permitiría la oclusión de los tejidos de manera normal, sin dañar las cualidades de éstas. Además Vidigal *et al.* (2009) reportaron que la conductividad eléctrica de las semillas disminuye durante el proceso de maduración de los frutos; considerando que una conductividad eléctrica baja indicaría la existencia de una buena organización de la membrana celular, lo cual favorecería al proceso de germinación. Así mismo, el proceso de maduración causa la pérdida de humedad de la semilla favoreciendo la germinación como sucedió en tomate de cáscara (Pérez-Camacho *et al.*, 2008) y ocasiona la degradación de hormonas inhibitoras de la germinación (Bradford, 2004).

4.3.1 Cinética de la germinación

De acuerdo con Matthews y Khajeh-Hosseini (2006), la importancia de la dinámica de la germinación radica en que muestra el posible potencial de vigor de una semilla para generar una plántula vigorosa; por lo que una germinación más lenta de un lote y con amplio tiempo o dispersión de la germinación en el tiempo produce plántulas heterogéneas y pequeñas.

En los chiles de árbol y ancho la germinación ocurrió a los 3 días después de haber instalado la prueba y en el chile guajillo a los 4 días (Figura 17). Las semillas extraídas inmediatamente germinaron en promedio 4 días después que

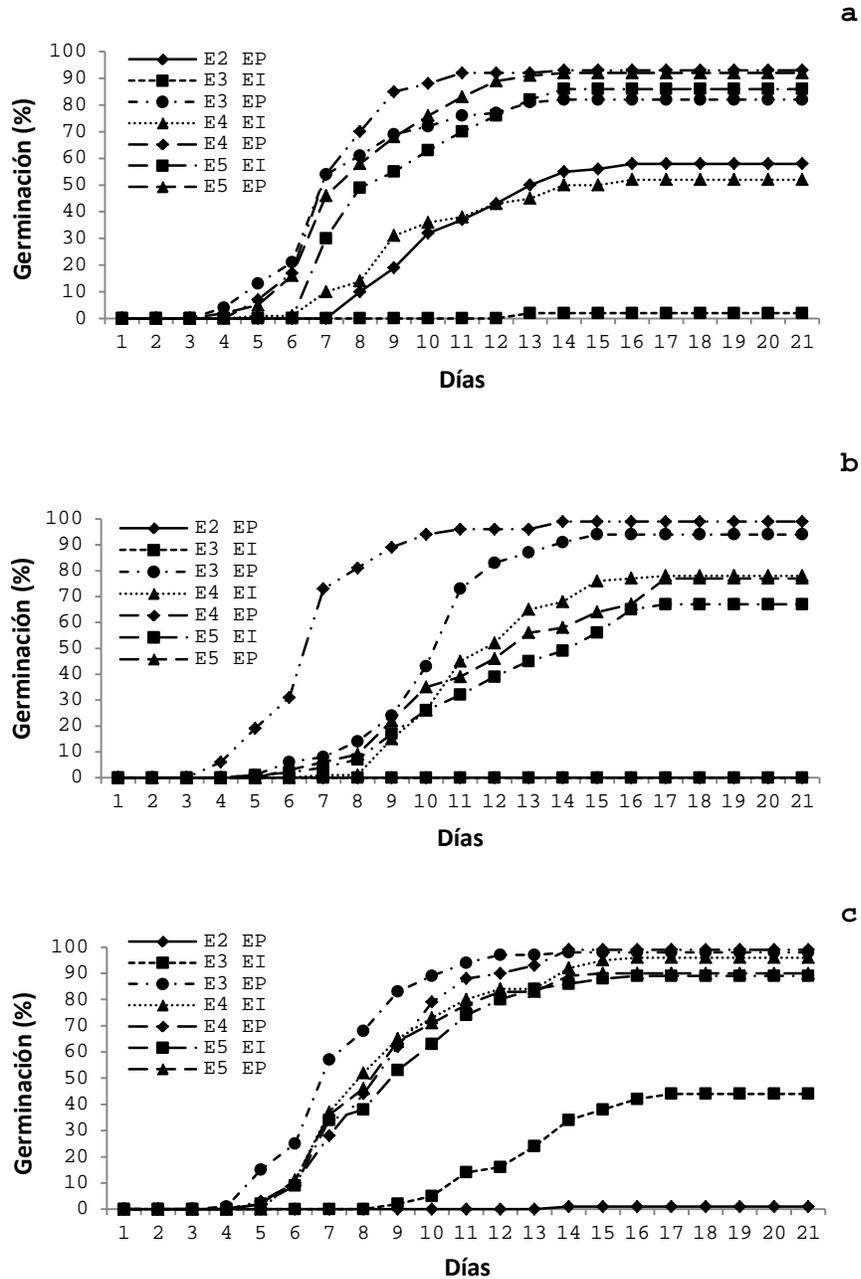


Figura 17. Germinación acumulada de semillas de chile de árbol (a), ancho (b) y guajillo (c). Obtenidas en E2 = 40 días después de antesis; E3 = Fruto con 50% de cambio de color; E4 = Cambio total del color del fruto; E5 = Fruto seco; y extraídas en la cosecha (EI) y después de 15 días (EP). El resto de combinaciones no se muestran porque no presentaron germinación.

las que tuvieron un reposo de 15 días dentro del fruto con valores menores de germinación total acumulada.

Las semillas obtenidas de los tratamientos 25 dda (E1) en ambos tiempos de extracción y 40 dda en extracción inmediata (E2, EI) fueron incapaces de germinar (Figura 17) posiblemente por ser aún inmaduras y contener una cantidad considerable de inhibidores de la germinación, ya que estos disminuyen conforme la semilla alcanza la madurez (Bradford, 2004). La germinación acumulada total en el chile de árbol del tratamiento 40 dda con extracción posterior resultó importante porque aunque la germinación se inició 4 días después que la del tratamiento más vigoroso hubo germinación (58 %) sugiriendo que dicho retraso pudo deberse a la lenta reactivación de las reservas acumuladas hasta esa etapa.

En el caso del chile guajillo el tratamiento de inicio de cambio de color y extracción inmediata (E3 EI) alcanzó hasta 44 % a los 17 días, lo que contrasta con los otros tipos en donde en la misma combinación de tratamientos se obtuvieron valores cercanos a cero. Así mismo, en chile de árbol el tratamiento de fruto maduro y extracción inmediata (E4 EI) tuvo una germinación de 52 % que fue inferior a la del tratamiento de fruto en inicio de cambio de color y extracción posterior (E3 EP), lo cual significa que la extracción posterior (EP) en una etapa más temprana en este tipo de chile ayudaría a una germinación más rápida, lo que pudiera considerarse para hacer más cortos los ciclos para el mejoramiento genético o la producción comercial de semilla.

Para los tres tipos de chile la máxima velocidad de germinación ocurrió entre los 6 y los 11 días, independientemente de la combinación de tratamientos; de acuerdo con las recomendaciones de la ISTA (2004) el conteo final de una prueba de germinación estándar debe realizarse a los 14 dds, en esta investigación, durante este conteo se obtuvo el mayor porcentaje de germinación de los lotes considerados más vigorosos que implican la extracción de semillas 15 días después de la cosecha de frutos totalmente maduros (EP);

sin embargo, en algunos lotes de semillas, especialmente los del chile ancho (E3 EP, E4 EI, E5 EI y E5 EP), todavía se presentó germinación después de los 14 dds, lo que indicaría que para evaluaciones posteriores podrían considerarse conteos hasta los 18 días. De acuerdo con Demir *et al.* (2008), en lotes de semillas de chile aquellas semillas que germinaron en un periodo más corto produjeron plántulas más grandes y con menor variabilidad, por lo que de las semillas en las que ocurrió la germinación más rápido y se alcanzó el máximo porcentaje de germinación en el menor tiempo posible podrían esperarse plántulas de mayor calidad que de aquellas provenientes de los tratamientos menos vigorosos.

4.4 CONCLUSIONES

En los tres tipos de chile las variables de calidad física (peso de 1000 semillas (PS) y peso volumétrico (PV)) siguieron una tendencia de incremento sigmoideal hasta alcanzar un máximo en la etapa de cambio de color de fruto en los tipos ancho y guajillo y hasta la etapa de fruto seco en el chile de árbol. En etapas previas al cambio total de color del fruto, dejar las semillas 15 días dentro del mismo favorece el incremento de PS y PV, pero en etapas de fruto completamente rojo y seco no existe diferencia con las semillas extraídas de frutos recién cosechados (EI). La extracción posterior mejora significativamente la calidad fisiológica (germinación y vigor), ya que en la etapa de inicio de cambio de color del fruto la germinación alcanzó en promedio 93.4 % comparada con las semillas de EI (6.7 %).

La mejor calidad de semillas de chiles ancho y guajillo se alcanzó al extraerlas 15 días después de la cosecha de frutos completamente rojos y en el chile de árbol cuando éstas se obtuvieron de frutos secos y se extrajeron 15 días después.

4.5 LITERATURA CITADA

- Aguilar-Rincón, VH, Corona Torres T, López López P, Latournerie Moreno L, Ramírez Meraz M, Villalon Mendoza H y Aguilar Castillo JA (2010) Los Chiles de México y su Distribución. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, IT-Conkal, UANL, UAN. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 114 p.
- Bino, R. J., H. Jalink, M. O. Oluoch and S. P. C. Groot. 1998. Seed research for improved technologies. *Scientia Agricola* 55:19-26.
- Bradford, K. J. 2004. Seed Production and Quality. Department of Vegetable Crops. University of California. Davis, California, U.S.A. 134 p.
- Buitendijk J.H., N. Pinsonneaux, A.C. Van Donk, M.S. Ramanna and A. A. M. Van Lammeren. 1995. Embryo rescue by half-ovule culture for the production of interspecific hybrids in *Alstroemeria*. *Scientia Horticulturae* 64:65-75.
- Copeland, L. O. and M. B. McDonald. 2001. Principles of Seed Science and Technology. 4th Ed. Burgues Publishing Company. pp: 122-169.
- Demir, I., S. Ermis, K. Mavi and S. Matthews. 2008. Mean germination time of pepper seed lots (*Capsicum annuum* L.) predicts size and uniformity of seedlings in germination tests and transplant modules. *Seed Science and Technology* 36:21-30.
- Dias, D. C. F. S., F. P. Ribeiro, L. A. S. Dias, D. J. H. Silva and D. S. Vidigal. 2006. Tomato seed quality in relation to fruit maturation and post-harvest storage. *Seed Science and Technology* 34:691-699.
- Doijode, S. D. 2001. Seed Storage of Horticultural Crops. Haworth Press. New York, USA. 339 p.

- Edwards, R. L. and F. J. Sundstrom. 1987. Afterripening and harvesting effects on Tabasco pepper seed germination performance. *HortScience* 22:473-475.
- International Seed Testing Association (ISTA). 2004. International rules for seed testing. Bassersdorf, CH-Switzerland.
- Kermode, A. R. 1995. Regulatory mechanisms in the transition from seed development to germination: interactions between the embryo and the seed environment. *In: J. Kigel, G. Galili, Eds. Seed Development and Germination. Marcel Dekker, Inc. New York. pp: 273-332.*
- Long-Solis, J. 1986. Capsicum y su Cultura. La Historia del Chilli. Fondo de Cultura Económica. México. 181 p.
- Matthews, S. and Khajeh-Hosseini, M. 2006. Mean germination time as indicator of emergence performance in soil of seed lots of maize (*Zea mays*). *Seed Science and Technology* 34:339-347.
- Mora, A., R., L. E. Mendoza O. y J. C. Molina M. 1990. Acumulación de materia seca, imbibición, viabilidad y germinación de semillas inmaduras de sorgo. *Revista Fitotecnia Mexicana* 13:55-66.
- Nuez, F., R. Gil Ortega y J. Costa. 2003. El Cultivo de Pimientos, Chiles y Ajíes. Ediciones Mundi-Prensa Madrid-España. 586 p.
- Pérez-Camacho, I., V. A. González-Hernández, J. C. Molina-Moreno, O. J. Ayala-Garay y A. Peña-Lomelí. 2008. Efecto de desarrollo y secado de semillas de *Physalis ixocarpa* Brot. en germinación, vigor y contenido de azúcares. *INCI* 33(10):762-766.
- Pérez-Tornero, O. y I. Porras. 2008. Assessment of polyembryony in lemon: rescue and in vitro culture of immature embryos. *Plant Cell and Tissue Culture* 93:173-180.

- Randle, W. M. and S. Honma. 1981. Dormancy in peppers. *Scientia Horticulturae* 14:19-25.
- Salisbury, F. B. and C. W. Ross. 1994. *Fisiología Vegetal*. Grupo Editorial Iberoamérica. México. D. F. 218 p.
- Sánchez, V. M., F. J. Sundstrom, G. N. McClure and N. S. Lang. 1993. Fruit maturity, storage and postharvest treatments affect bell pepper (*Capsicum annuum* L.) seed quality. *Scientia Horticulturae*, 54:191-201.
- SAS. 2002. Statistical Analysis System. Version 9.0. SAS Institute Inc., Cary, N. C. USA.
- Sayed, M. S. and M. Essam. 1952. Viability of seeds harvested from fruits at different stages of maturity. *Proceedings of American Society for Horticultural Science* 60:327-329.
- SIAP. 2011. Anuario de la Producción Agrícola del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. [En línea] Disponible en <http://www.siap.gob.mx>
- Taiz L. and E. Zeiger. 2010. *Plant Physiology*. 5th Ed. Sinauer Associates, Inc., Publishers. Sunderland, Massachusetts. 764 p.
- Valdés, V., P. Anguita y C. Ulriksen. 1992. Efecto del estado de madurez de los frutos de pimiento (*Capsicum annuum* L.) sobre la calidad de la semilla [Keystone Giant Resistant, Maor]. *Ciencia e Investigación Agraria* 19(1-2):3-7.
- Vidigal, D. S., D. C. F. S. Dias, E. R. V. Von Phino and L. A. S. Dias. 2009. Sweet pepper seed quality and lea-protein activity in relation to fruit maturation and post-harvest storage. *Seed Science and Technology* 37: 192-201.

Wurr, D. C. E. and J. R. Fellows. 1983. The effect of the time of seedling emergence of crisp lettuce on the time of maturity and head weight at maturity. *Journal of Horticultural Science* 58:561-566.

V. DISCUSIÓN GENERAL Y PERSPECTIVAS

La importancia del cultivo de chile radica en su uso como alimento, pues se ha utilizado por diferentes culturas como condimento para la preparación de diferentes platillos. Recientemente se han reportado usos en la medicina debido a la actividad antioxidante que se ha encontrado en las capsaicinas, el principal metabolito responsable del picor de los chiles.

La producción de chile en el mundo se divide en dos vertientes, la producción de chiles secos y la de chiles verdes. India y China son los países con mayor producción de chiles secos en el mundo; China, es también un gran productor de chiles verdes junto con Turquía y México.

En México la producción de chiles se ubica en todo el territorio nacional, reportándose como principales productores Zacatecas, Chihuahua y Sinaloa. Sin embargo, además de las variedades comerciales, en México, por ser el centro de domesticación de *C. annuum* L., la especie más ampliamente distribuida, se encuentra una gran diversidad de materiales que se utilizan principalmente a nivel local.

Los tipos de chile utilizados en esta investigación se encuentran entre los más importantes por el volumen de producción, de ahí el interés por generar información que pueda utilizarse para tener más conocimiento de estos y específicamente de los diferentes tipos que la constituyen.

Los temas aquí estudiados han sido reportados en algunos trabajos para la especie, sin embargo, no existe información en la literatura de estudios realizados sobre los tipos aquí usados. La información sobre el crecimiento y desarrollo de plantan y semilla se realizaron sobre todo en el llamado chile bell, además, la información no es reciente.

En el capítulo III de esta tesis se estudió la distribución de la biomasa mediante un análisis de crecimiento y el cálculo de tasas de crecimiento, que

indicaron que los tipos estudiados son muy similares en la forma de distribuir la biomasa y en las tendencias de las tasas. No obstante, fueron diferentes en cuanto a la eficiencia fotosintética siendo el chile ancho el más eficiente.

A pesar de la información colectada en este capítulo, se pueden buscar mejoras que brinden valores más concisos, por ejemplo, en el análisis de crecimiento y evaluación de variables fisiológicas, un mayor número de muestreos que permitieran una explicación más amplia del ciclo y crecimiento, podría ayudar a la definición de estrategias de incremento de la producción. Por otra parte, mayor atención y planeación de una investigación enfocada a la fotosíntesis de las hojas jóvenes, maduras y aquellas con demanda directa de flores y frutos, resultaría interesante para explicar lo que se encontró al respecto en esta investigación del porque una hoja con demanda directa fotosintetiza menos que una hoja joven, cuando se podría pensar que dicha hoja debe aportar mayor cantidad de fotoasimilados.

El capítulo IV se enfocó en evaluar la calidad de semillas en diferentes etapas de desarrollo y con diferentes etapas de extracción, dando como resultado que las semillas cosechadas en etapas próximas o durante la madurez del fruto son aquellas que tienen mejor calidad física y fisiológica, además que la etapa de extracción puede ser el factor determinante de la calidad pues la extracción posterior fue la que proporcionó semillas con cualidades fisiológicas más deseables.

Por los resultados obtenidos en este capítulo, considero que podrían incorporarse otras variables para conocer el desarrollo bioquímico y fisiológico de éstas, por ejemplo, realizar pruebas de determinación de azúcares, proteínas y hormonas durante las etapas de desarrollo. Además, al notar que la etapa de extracción determinó la magnitud la calidad de las semillas, se puede enfocar una investigación para evaluar los cambios que ocurren en la semilla durante el periodo post cosecha del fruto y hasta la extracción de ésta con muestreos continuos donde se realicen pruebas de peso de semillas, desarrollo de

embrión, medición de hormonas y determinación de azúcares y proteínas y de ser posible con la incorporación de técnicas moleculares.

Todos estos estudios pueden llevarse a cabo en otros tipos de chile dentro y fuera de *Capsicum annuum* ya que aun siendo tipos que pertenezcan a la misma especie su comportamiento podría ser diferente.