



Respuesta del desarrollo, crecimiento y rendimiento en cantidad y calidad a variaciones termo-foto periódicas en chía (*Salvia hispanica* L.)

Tesis presentada para optar al grado de Doctor en Ciencias Biológicas

Facultad de Ciencias Naturales

Universidad Nacional de Salta

Por

Ing. Agr. Jimena María Pérez Brandán

Director: Dr. Martín Moisés Acreche

Co-directora: Dra. Guadalupe Galíndez

Año 2022



*... La batalla de la vida no siempre la gana
El más fuerte o el más veloz,
Tarde o temprano, el que gana,
Es aquel que cree poder hacerlo...
-Napoleón Hill-*

A mi familia

Agradecimientos

A mi director Martín Acreche por guiarme académicamente y por transmitirme su entusiasmo. Por las horas dedicadas a discutir temas relacionados a mi formación académica y, en ocasiones, temas relacionados a la vida misma. A mi co-directora Guadalupe Galindez por su disposición a ayudarme siempre que fuera necesario.

Un muy especial agradecimiento para mi colega y amigo Juan Anuch con quien compartimos, entre mates y galletitas, tablas de Excel y programas estadísticos, largas jornadas laborales, llenas de risas, charlas y algún que otro cerrito. A él y a su esposa Surai gracias infinitas por el soporte constante, cariño y ayuda desinteresada. A mi muy querida compañera de oficina y profesora de universidad Josefina Diez por su incondicional apoyo y aporte constante para mi crecimiento como profesional, pero también como persona.

A mis compañeros del área de Ecofisiología de cultivos de la Estación Experimental Agropecuaria Salta de INTA, David Vargas, Mario Martínez y Federico Chocobar, con quienes compartí a lo largo de estos años, desde las tan ajetreadas siembras de inicios de campaña, pasando por los raleos, riegos, desmalezamientos, aplicación de fitosanitarios hasta las muy “artesanales” trillas y conteos de semillas de fin de cosecha. De todos ellos aprendí las tareas de campo, el oficio del agricultor y el valor del trabajo en equipo.

También quiero agradecer al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas por haberme otorgado la beca, y al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria por brindarme la estructura y los recursos necesarios que posibilitaron llevar adelante mi trabajo de tesis doctoral. De INTA me llevo, además, la invaluable amistad de Guillermina Socias, Jesús Mosciario, Laura Vale, Yanina Noe, Jorgelina Huidobro, Nancy Torres y Adriana Godoy.

Mi especial agradecimiento al Dr. Ramiro Curti por las horas dedicadas, por su generosidad, excelente predisposición y compromiso, y a la Dra. Ana Scopel por el acompañamiento y guía durante estos largos años de trabajo. Sin ambos, esta tesis no hubiera sido posible.

A la Dra. Natalia Izquierdo y su equipo por la oportunidad de realizar una pasantía de capacitación en el Laboratorio de Calidad de Granos y Aceites de la Estación Experimental Agropecuaria Balcarce INTA Balcarce.

A mis amigos de la vida, en especial a Samuel, Soledad, María José, Mariana y Cucú.

A Elba y Carlos, mis padres; a Carolina y Cecilia mis hermanas; a Francisco, mi hermano; a Gustavo y Danilo, mis cuñados; y a Olivia, Felipe y Baltazar, mis sobrinos. Ustedes son mi norte.

*Esta tesis se realizó en la Estación Experimental Agropecuaria Salta del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). La misma contó con el aporte del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) que aportó la beca doctoral de JMPB. El financiamiento de los ensayos se realizó mediante los proyectos PICT 2015 N°875 “Respuestas del desarrollo, crecimiento y rendimiento en cantidad y calidad a variaciones termo-foto-periódicas en chíá (*Salvia hispanica* L.): Estudios ecofisiológicos orientados al manejo y mejoramiento genético del cultivo” e INTA PNIND 2013-2019 1108064 “Bases ecofisiológicas del mejoramiento y sistemas de cultivo”.*

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

Índice General

Índice General.....	v
Índice de Figuras.....	xi
Resumen.....	xv
Abstract.....	xvii
Capítulo 1.....	1
Introducción General.....	1
1.1 Descripción general de la chía.....	1
1.1.1 Taxonomía, origen e historia.....	1
1.1.2 Características morfológicas y reproductivas de la chía.....	2
1.1.3 Importancia de la chía en la alimentación humana.....	3
1.1.4 El cultivo de chía.....	4
1.1.5 Mercados y comercialización de la chía.....	5
1.2 Variables ambientales que regulan el crecimiento y desarrollo de los cultivos: temperatura, fotoperíodo y vernalización.....	6
1.2.1 Marco teórico general.....	6
1.2.2 Efecto de la temperatura y el fotoperíodo sobre la duración de las fases de desarrollo.....	10
1.2.3 Duración de las fases y su relación con los componentes asociados al rendimiento.....	11
1.2.4 Respuestas a la temperatura y al fotoperíodo de la chía.....	12
1.3 Incidencia de las condiciones ambientales sobre el rendimiento y calidad.....	13
1.3.1 Respuesta del rendimiento y calidad de la chía a factores ambientales.....	14
1.4 Declaración del problema.....	14
1.5 Objetivos e hipótesis.....	16
1.5.1 Objetivo general.....	16
1.5.2 Objetivos específicos.....	16
1.5.3 Hipótesis.....	16

1.6 Justificación del estudio.....	17
1.7 Bibliografía.....	18
Capítulo 2.....	29
Escala fenológica estandarizada para la chía.....	29
2.1 Introducción.....	29
2.2 Materiales y métodos.....	31
2.2.1 Condiciones generales del ensayo.....	31
2.2.2 Material genético.....	31
2.2.3 Diseño experimental y tratamientos.....	31
2.2.4 Mediciones realizadas.....	32
2.3 Resultados y discusión.....	33
2.3.1 Etapas de crecimiento principales.....	33
2.3.2 Etapas de crecimiento secundarias.....	35
2.3.2.1 Etapa de crecimiento principal 0. Germinación.....	35
2.3.2.2 Etapa de crecimiento principal 1. Aparición de hojas.....	36
2.3.2.3 Etapa de crecimiento principal 2. Aparición de ramas.....	37
2.3.2.4 Etapa de crecimiento principal 5. Crecimiento de la inflorescencia.....	38
2.3.2.5 Etapa de crecimiento principal 6. Floración.....	38
2.3.2.6 Etapa de crecimiento principal 7. Cambios en el fruto.....	39
2.3.2.7 Etapa de crecimiento principal 8. Maduración.....	39
2.3.2.8 Etapa de crecimiento principal 9. Senescencia.....	39
2.4 Conclusiones.....	40
2.5 Bibliografía.....	41
Capítulo 3.....	45
Respuestas del desarrollo de chía a variaciones en el termo-fotoperíodo.....	45
3.1 Introducción.....	45
3.2 Materiales y Métodos.....	47
3.2.1 Ensayo bajo condiciones controladas.....	47

3.2.2 Experimento de campo.....	50
3.2.2.1 Muestreo y mediciones para el experimento de campo.....	51
3.2.2.2 Análisis estadísticos para el experimento de campo.....	52
3.3 Resultados.....	54
3.3.1 Temperaturas cardinales de la chíá.....	54
3.3.2 Condiciones foto-termales y duración de las sub-fases de pre-floración.....	54
3.3.3 Modelo foto-termal.....	58
3.3.4 Duración de las sub-fases, peso seco del verticilastro en floración, radiación interceptada acumulada y rendimiento.....	60
3.4 Discusión.....	63
3.5 Conclusión.....	64
3.6 Bibliografía.....	65
Capítulo 4.....	70
Efecto de las condiciones ambientales en la generación del rendimiento y calidad de la chíá.....	70
4.1 Introducción.....	70
4.2. Materiales y Métodos.....	75
4.2.1 Fenología.....	76
4.2.2 Biomasa, partición, rendimiento y sus componentes.....	76
4.2.3 Radiación interceptada y eficiencia de uso de la radiación.....	77
4.2.4 Calidad de granos.....	77
4.2.4.1 Determinación del contenido de proteínas.....	78
4.2.4.2 Determinación del contenido de aceite y la concentración de ácidos grasos.....	79
4.2.5 Análisis estadísticos.....	79
4.3 Resultados.....	81
4.3.1 Condiciones ambientales durante el período de llenado.....	81
4.3.2 Rendimiento y sus componentes.....	82
4.3.3 Generación de la biomasa seca total y partición.....	85

4.3.4 Componentes de calidad del grano.....	88
4.4 Discusión.....	95
4.4.1 Determinación del rendimiento del cultivo.....	95
4.4.2 Determinación de la calidad de granos.....	97
4.5 Conclusión.....	101
4.6 Bibliografía.....	102
Conclusiones generales y Perspectivas futuras.....	111
1) Principales hallazgos de la tesis.....	111
I) Conocimiento original, novedoso y universal aportado por esta tesis.....	111
II) Conocimiento original que permite aclarar cuestiones poco claras en la literatura o extra polar la información de otras regiones a las condiciones del Valle de Lerma, Salta.....	112
III) Conocimiento que confirman hallazgos existentes realizados en distintos ambientes.....	113
2) Líneas de investigación futuras.....	113
Bibliografía.....	115

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Descripción de los estadios fenológicos de chía (<i>Salvia hispanica</i> L.) de acuerdo con la escala BBCH.....	34-35.
Tabla 3.1. Cuadrados medios para genotipos, fechas de siembra, interacción genotipo por fechas de siembra y bloques para la duración en tiempo térmico (°Cd) de sub-fases en pre-floración, peso seco de verticilastro en floración (PSV _{FL} , g m ⁻²) y rendimiento de grano (g m ⁻²) en chía.....	56.
Tabla 3.2. Parámetros del modelo ajustado (propuesto en la Ecuación 3.2) para las sub-fases 1PHE (primer par de hojas expandidas-IA (inducción del ápice), IA-AV (aparición del verticilastro) y AV-iFL (iniciación floral).....	59.
Tabla 4.1. Cuadrados medios para FS, G y su interacción (FS*G) para las variables peso de mil granos (PMG), número de granos (NG), número de granos por verticilastro (NGV), número de verticilastros (NV), peso seco de verticilastros (PSV), rendimiento (R) y NG/PSV en el cultivo de chía.....	83.
Tabla 4.2. Cuadrados medios para fecha de siembra, genotipo, y su interacción para biomasa seca total (BST), índice de cosecha (IC), radiación interceptada acumulada (RIA) y eficiencia de uso de la radiación (EUR).....	87.
Tabla 4.3. Comparación de medias para la biomasa seca total (BST), índice de cosecha (IC), radiación interceptada acumulada (RIA), eficiencia de uso de la radiación (EUR).....	88.
Tabla 4.4. Cuadrados medios para fecha de siembra, genotipos y su interacción para el porcentaje de aceite, el porcentaje de proteínas y la composición lipídica. El perfil lipídico fue determinado para los ciclos agrícola 2017 y 2018, mientras que el porcentaje de proteínas solo para el ciclo agrícola 2017.....	90.
Tabla 4.5. Porcentaje de aceite, porcentaje de proteínas y composición lipídica de granos para siete fechas de siembra y dos genotipos de chía. El perfil lipídico fue determinado para los ciclos agrícola 2017 y 2018, mientras que el porcentaje de proteínas solo para el ciclo agrícola 2017.....	91.
Tabla 4.6. Coeficientes de correlación entre los atributos de calidad de los granos de chía y condiciones ambientales en los ciclos 2017 y 2018. La composición del aceite y el perfil lipídico se realizaron para los ciclos 2017 y 2018, mientras que la concentración de proteínas sólo para el ciclo 2017.....	92.

Tabla 4.7. Coeficientes de correlación entre los atributos de calidad de los granos de chía y condiciones ambientales en los ciclos 2017 y 2018. La composición del aceite y el perfil lipídico se realizaron para los ciclos 2017 y 2018, mientras que la concentración de proteínas sólo para el ciclo 2017.....93.

Índice de Figuras

- Figura 1.1:** Foto y diagrama describiendo diferentes órdenes de ramas y verticilastos en chía (*Salvia hispanica* L.). Adaptado de Diez et al. (2021).....3.
- Figura 1.2.** Respuesta idealizada de (a) la duración de una fase fenológica y (b) su inversa (la tasa de desarrollo) de un cultivo ante diferentes temperaturas. T_b , T_o y T_m representan las temperaturas base, óptima y máxima de desarrollo, respectivamente. Adaptado de Andrade y Sadras (2002).....7.
- Figura 1.3.** Respuestas cuantitativas de plantas de días largos y plantas de días cortos al fotoperíodo. FIP: fase inductiva al fotoperíodo. FVB: fase vegetativa básica. Adaptada de Major y Kiniry (1991).....9.
- Figura 2.1.** Etapas fenológicas de la chía (*Salvia hispanica* L.) según la escala BBCH. Por nomenclatura, cuando dos fases fenológicas coinciden en el tiempo, se utiliza una barra vertical entre ellas. 06 = radícula enlongada; 10 = cotiledones expandidos; 11 = primer par de hojas expandido; 14/21 = cuarto par de hojas expandidos y/o primer par de ramificaciones laterales; 50 = verticilastro detectable en la parte superior del tallo principal; 51 = verticilastro diferenciado de las hojas; 61 = comienzo de la floración; 65 = plena floración; 69 = fin de floración.....36.
- Figura 2.2.** Diagrama que muestra la arquitectura de la planta de chía (*Salvia hispanica* L.) en etapas vegetativas y reproductivas. Los números describen la escala BBCH. Se utiliza una barra lateral cuando dos fases coinciden en el tiempo. 10 = cotiledones expandidos; 13 = tercer par de hojas expandido; 14/21 = cuarto par de hojas expandidos y/o primer par de ramificaciones laterales; 25/51 = quinto par de ramificaciones laterales y/o verticilastro detectable en la parte superior del tallo principal; 51 = verticilastro diferenciado de las hojas; 55 = verticilastro separado de las hojas.....37.
- Figura 2.3.** Etapas fenológicas para el período de llenado de grano de chía (*Salvia hispanica* L.) según la escala BBCH. 81 = granos inmaduros con pericarpio amarillo pálido; 89 = granos maduros con pericarpio marrón grisáceo; 97 cultivo seco y maduro; 99 = granos cosechados.....40.
- Figura 3.1.** Imagen digitalizada de la incubadora de crecimiento donde se puede observar el sistema operativo de funcionamiento.....49.
- Figura 3.2.** Tasa de desarrollo en función de la temperatura para la sub-fase 1PHE a AV de chía. Los puntos representan los valores reales (se promediaron genotipos), la línea sólida el ajuste de la función bilineal, y la línea punteada representa la proyección de la curva

descendente mostrando el punto de corte de la temperatura máxima. En el eje de las abscisas se indican también las temperaturas base, óptima y máxima. $y \text{ (día}^{-1}\text{)} = (0,0022 * (\text{temperatura} - T_b)) \text{ (si temperatura} \leq T_{op}) + ((0,0022 * (T_{op} - T_b) + 0,0012 * (\text{temperatura} - T_{op})) \text{ (si temperatura} > T_{op})$. $R^2 = 0,97$; $p < 0,0001$54.

Figura 3.3. Temperaturas medias (líneas discontinuas) y fotoperíodo (línea continua) para los experimentos durante los ciclos agrícolas 2015-2016, 2017 y 2018. Las barras (y los números entre paréntesis en las mismas) representan la duración (en días calendarios) de la fase de desarrollo desde la emergencia hasta el inicio de la floración de diferentes fechas de siembra (FS).en chíá. Las fechas de siembra del 29/03 y 19/04 del 2016 no se muestran ya que las mismas no alcanzaron la floración.....55.

Figura 3.4. Duración (°Cd) para las sub-fases de pre-floración en distintos genotipos de chíá en 17 fechas de siembra. (a) población negra; (b) población blanca. Emergencia (E)-primer par de hojas expandidas (1PHE), 1PHE-inducción del ápice (IA), IA-aparición del verticilastro (AV), AV-iniciación de floración (iFL). Los números sobre las barras indican el número de hojas expandidas acumuladas \pm desvío estándar. Los números en negrita a la derecha de las barras indican los valores promedio de filocrono \pm desvío estándar para el período 1PHE-AV ($T_b = 6$ °C).....57.

Figura 3.5. Duración (°Cd) para la sub-fase desde el primer par de hojas expandido (1PHE) hasta la iniciación de floración (iFL) en función del fotoperíodo medio de la etapa para los genotipos de chíá blanco (○) y negro (●). La línea continua representa el modelo bilineal ajustado: $TT = -14369 + 1160 * 12,91$ ($P \leq 12,91$); $TT = -14369 + 1160 * P$ ($P > 12,91$).....59.

Figura 3.6. Relaciones entre el peso seco del verticilastro en floración (PSV_{FL}) y la duración (°Cd) de las sub-fases (a) emergencia (E)-primer par de hojas expandidas (1PHE), (b) 1PHE-inducción del ápice (IA), (c) IA-aparición del verticilastro (AV) y (d) AV-inicio de floración (iFL) en chíá para los ciclos agrícola 2017 y 2018. Se muestran ecuaciones de regresión lineal ajustadas para cada relación, más el coeficiente de regresión (R^2) y los valores de p.....60.

Figura 3.7. Relación entre el rendimiento de grano y el peso seco del verticilastro en floración en chíá. Se muestra el coeficiente de regresión (R^2) y el valor p. Debido a episodios de vuelco y alteraciones del crecimiento durante el llenado de grano debido a plagas, enfermedades y/o heladas tempranas durante los ciclos 2017 y 2018, se descartaron algunas fechas de siembra.....61.

Figura 3.8. Relaciones entre la radiación interceptada acumulada (RIA) (MJ m^2) y la duración ($^{\circ}\text{Cd}$) de las sub-etapas (a) emergencia (E)-primer par de hojas expandidas (1PHE), (b) 1PHE-inducción del ápice (IA), (c) IA-aparición de verticilastos (AV) y (d) AV-inicio de floración (iFL) en chíá. Se muestran ecuaciones de regresión lineal ajustadas para cada relación más el coeficiente de regresión (R^2) y los valores de p.....62.

Figura 3.9. Relación entre en rendimiento de grano y la radiación interceptada acumulada (RIA) en la etapa E-iFL en chíá. Se muestra el coeficiente de regresión R^2 y el valor p.....62.

Figura 4.1. Representación de dos enfoques diferentes y complementarios para analizar el rendimiento del grano. El panel derecho en la figura consiste en dividir el rendimiento del grano en componentes numéricos del mismo. El enfoque basado en la partición de la biomasa total (panel izquierdo) está basado en la acumulación de biomasa y cómo ésta es particionada a los diferentes órganos en crecimiento. EUR es la eficiencia en el uso de la radiación. Adaptado de Slafer y Savin (2006).....72.

Figura 4.2. Esquema simplificado de la síntesis de ácidos grasos. Las siglas KAS II (3-cetoacil-ACP), SAD ($\Delta 9$ -esteroil PC desaturasa), OLD ($\Delta 12$ -linoleoil PC desaturasa), LLD ($\Delta 15$ -oleil PC desaturasa) representan las enzimas intervinientes en el proceso. Adaptado de Ohlrogge y Jaworski, 1997.....75.

Figura 4.3. Temperaturas máximas y mínimas (líneas discontinuas), fotoperíodo y radiación incidente (líneas continuas) para los experimentos de fecha de siembra durante el período de llenado de grano para los ciclos agrícolas 2017 y 2018. Las barras representan la duración (en días calendarios) de la fase de desarrollo desde el inicio de la floración a madurez fisiológica de diferentes fechas de siembra (FS) en chíá.....82.

Figura 4.4. Efecto de las distintas fechas de siembra sobre el peso de mil granos (PMG; a), el número de granos (NG; b), el número de verticilastos (NV, c), el rendimiento (R; d), el peso medio de verticilastos a cosecha (PSV; e), el número de granos por verticilastro (NGV; f) y el número de granos por unidad de peso seco de verticilastro a cosecha (NGV/PSV; g) en chíá para los ciclos agrícolas 2017 y 2018. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre fechas de siembra mediante el test LSD de Fisher con una $p < 0,05$. Las barras representan el error estándar.....84.

Figura 4.5. Efecto del genotipo sobre el peso de mil granos (PMG; a), el número de granos (NG; b), el número de granos por verticilastro (NGV; c) y el número de granos por unidad de peso seco de verticilastro (NG/PSV; d) en chíá para los ciclos agrícolas 2017 y 2018. Letras

diferentes muestran diferencias significativas entre genotipos mediante el test LSD de Fisher con una $p < 0,05$. Las barras representan el error estándar.....85.

Figura 4.6. Relaciones entre el rendimiento y el número de granos (NG; a) y peso de mil granos (PMG; b), y entre el NG y el número de verticilastros (NV; c) y el número de granos por verticilastro (NGV; d) en chíá para los ciclos agrícolas 2017 y 2018. Se muestran ecuaciones de regresión lineal ajustadas para cada relación con su correspondiente coeficiente de regresión (R^2) y valores p86.

Figura 4.7. Relaciones entre el rendimiento y biomasa seca total (BST; a), radiación interceptada acumulada (RIA; b), índice de cosecha (IC; c) y eficiencia de uso de la radiación (EUR, d) en chíá para los ciclos agrícolas 2017 y 2018. Se muestran ecuaciones de regresión lineal ajustadas para cada relación con su correspondiente coeficiente de regresión (R^2) y valores p88.

Figura 4.8. Relación entre la concentración de proteínas (P) y la concentración de aceite (A), expresados en porcentaje. Se muestra la ecuación de regresión lineal con su correspondiente coeficiente de regresión (R^2) y valor p92.

Figura 4.9. Relación entre la radiación interceptada acumulada durante el llenado de grano y el porcentaje de aceite en grano en chíá ($\text{Aceite (\%)} = 23 + 0,0097 * \text{MJ m}^{-2}$, para $\text{MJ m}^{-2} < 1231$; $\text{Aceite (\%)} = 23 + 0,0097 * 1231$, para $\text{MJ m}^{-2} \geq 1231$; $R^2 = 0,33$). La flecha negra indica el cambio en la dinámica de acumulación de aceite a medida que cambia la RIA. Se muestra la ecuación de regresión lineal con su correspondiente coeficiente de regresión (R^2) y valor p94.

Figura 4.10. Relación entre la radiación interceptada acumulada durante el llenado de grano y la concentración de ácido oleico en el aceite de chíá ($\text{Oleico (\%)} = 4,61 + 0,00121 * \text{MJ m}^{-2}$, para $\text{MJ m}^{-2} < 1472$; $\text{Oleico (\%)} = 4,61 + 0,00121 * 1472$, para $\text{MJ m}^{-2} \geq 1472$; $R^2 = 0,38$). La flecha negra indica el cambio en la dinámica de acumulación de ácido oleico a medida que cambia la RIA. Se muestra la ecuación de regresión lineal con su correspondiente coeficiente de regresión (R^2) y valor p94.

Figura 4.11. Relaciones entre las concentraciones de (a) ácidos palmítico y esteárico, (b) ácidos palmítico y oleico, (c) ácidos oleico y esteárico, (d) ácidos oleico y linolénico y (e) ácidos linoleico y linolénico. Se muestra la ecuación de regresión lineal con su correspondiente coeficiente de regresión (R^2) y valores p95.

Resumen

La chía (*Salvia hispanica* L.) es un cultivo de grano anual perteneciente a la familia de las Lamiaceae. Es la fuente vegetal con la mayor concentración de ácidos grasos omega-3 (64% del aceite total del grano), los cuáles son importantes para la salud humana porque disminuyen la prevalencia de enfermedades cardiovasculares y nunca se han sintetizado artificialmente. Esta característica ha generado una renovada demanda de este cultivo en los últimos años en todo el mundo. Sin embargo, existe poca información respecto a cuestiones ecofisiológicas básicas del cultivo que limitan la aplicación de prácticas de manejo tendientes a maximizar el rendimiento tanto en cantidad como en calidad. Para contribuir al conocimiento de los aspectos mencionados, en esta tesis se llevaron adelante ensayos bajo condiciones controladas y a campo con dos poblaciones comerciales de chía disponibles en Argentina. Una de ellas es la chía blanca (chía con flores y granos blancos), y la otra es la chía negra (con flores púrpuras y granos mixtos: blancos, beige y marrón grisáceo). Los ensayos bajo condiciones controladas se realizaron en una cámara de crecimiento con control térmico, fotoperiódico e hídrico, para determinar las temperaturas cardinales de desarrollo y crecimiento del cultivo. Los ensayos de campo se realizaron en Salta, Argentina (24° 53' 32" S, 65° 28' 26" O, 1420 m s.n.m.), y permitieron alterar, a través de distintas fechas de siembra, el ambiente foto-termal donde creció el cultivo. Los objetivos de estos ensayos fueron (i) determinar las respuestas de desarrollo en pre-floración de la chía a variaciones en las condiciones del termo-fotoperíodo, y explorar el impacto de estos cambios en componentes tempranos (en floración) y a cosecha del rendimiento del cultivo; y (ii) evaluar cómo las variaciones ambientales impactan en la generación de la biomasa total y su partición, los componentes numéricos del rendimiento y la calidad de los granos de chía. Para poder uniformar los resultados de esta tesis, se desarrolló la primera escala fenológica estandarizada para la chía en base al método propuesto por la Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt and Chemical Industry (BBCH) y se determinó que la temperatura base de desarrollo de la chía es 6 °C. La respuesta de ambos genotipos al fotoperíodo fue similar. La chía presenta una respuesta característica de plantas de día corto. El umbral de fotoperíodo crítico para iniciación floral es 12,91 horas, más allá del cual el cultivo presenta una sensibilidad fotoperiódica de 1160 °Cd por hora de atraso en el fotoperíodo. En el caso de la inducción del ápice, el umbral de fotoperíodo crítico es 13,16 horas y la sensibilidad fotoperiódica de 506 °Cd por hora de atraso en el fotoperíodo. El alargamiento de la duración de las sub-fases de pre-floración en respuesta a mayores fotoperíodos incrementa el peso

seco de los verticilastos en floración, lo cual repercute en mayores rendimientos. El genotipo negro presenta mayor partición de asimilados a nivel de verticilastos (gramos de verticilastro por grano) respecto al genotipo blanco, lo que genera un mayor número de granos y rendimiento. Las temperaturas, tanto diurnas como nocturnas, durante el llenado de los granos presentan una relación positiva con el porcentaje de aceite, pero no existen evidencias suficientes para determinar el efecto de la temperatura sobre la composición lipídica de los mismos. La radiación interceptada acumulada durante el llenado de los granos presentó efectos positivos sobre el porcentaje de aceite y el contenido de ácido oleico, aunque existe un valor umbral a partir del cual ya no hay aumento en ambas variables (1231 MJ m⁻² y 1472 MJ m⁻² para porcentaje de aceite y ácido oleico, respectivamente). Los mayores rendimientos en chía se lograron en fechas de siembra donde se maximizó la intercepción de la radiación y la eficiencia en el uso de la misma, generando mayor cantidad de biomasa seca total y partición de la misma a verticilastos y dentro de verticilastos (para las condiciones ambientales de Salta, Argentina, estas fechas de siembra van desde enero a mediados de febrero).

Abstract

Chía (*Salvia hispanica* L.) is an annual grain crop belonging to the Lamiaceae family. It is the vegetable source with the highest concentration of omega-3 fatty acids (64% of the total oil of the grain). These fatty acids, which have never been artificially synthesized, are important for human health because they reduce the prevalence of cardiovascular diseases. This characteristic has generated a renewed demand for this crop in recent years around the world. However, there is little information available about the crop's basic eco-physiological issues, which limit the application of management practices aimed at maximize yield in both in quantity and quality. In order to minimize the scarceness of knowledge, two types of experiments were carried out in this thesis: under controlled and under field conditions. Two commercial populations of chía available in Argentina were used for those experiments. One of them was the "white chía" with white flowers and grains, and the other was the "black chía" with purple flowers and mixed grains (white, beige, and grayish brown). The experiments under controlled conditions were carried out in a growth chamber with thermal, photoperiod, and water control to determine the cardinal temperatures of development and growth of the crop. The field trials were carried out in Salta, Argentina (24° 53' 32" S, 65° 28' 26" O, 1420 m o.s.l.), and allowed the crops' photo-thermal environment to be altered through different sowing dates. The objectives of these experiments were (i) to determine the pre-flowering development responses of chía to variations in thermo-photoperiod conditions and to explore the impact of these changes on early (flowering) and harvest yield components of the crop; and (ii) to evaluate how environmental variations impact the generation of total biomass and its partition, the numerical components of yield, and the quality of chía grains. In order to standardize the results of this thesis, the first phenological scale for chía was developed based on the method proposed by the Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt and Chemical Industry (BBCH), and it was also determined that the base temperature for the development of chía is 6°C. Both chía genotypes had the same photoperiod response. This is a characteristic short-day plant response. The critical photoperiod threshold for flower initiation is 12.91 hours, beyond which the crop presents a photoperiod sensitivity of 1160 °Cd per hour of delay in the photoperiod. In the case of apex induction, the critical photoperiod threshold is 13.16 hours and the photoperiod sensitivity is 506 °Cd per hour of photoperiod delay. The lengthening of the duration of the pre-flowering sub-phases in response to longer photoperiods increases the dry weight of the verticillaster at flowering, which also generates higher yields. The black genotype presents the greatest partition of assimilates at the verticillaster level (grams of verticillaster

per grain), which generates the greatest number of grains and yield. The temperature (both day and night) during the grain filling period presents a positive relationship with the percentage of oil, but there is no evidence to determine the effect of temperature on lipid composition. The cumulative intercepted photosynthetically active radiation accumulated during the grain filling period presented positive effects on the percentage of oil and the content of oleic acid; however, there is a threshold value beyond which there is no increase in both variables (1231 MJ m⁻² and 1472 MJ m⁻² for oil and oleic acid, respectively). The highest yields in chía were achieved on those sowing dates where cumulative intercepted photosynthetically active radiation and radiation use efficiency were maximized, generating a greater amount of total dry biomass and its partitioning to verticillaster and within verticillaster (for the environmental conditions of Salta, Argentina, these sowing dates range from late January to mid-February).

Capítulo 1

Introducción General

1.1 Descripción general de la chía

La chía (*Salvia hispanica* L.) es una planta herbácea anual de verano perteneciente a la familia de las Lamiaceae. Su fruto indehiscente, comúnmente llamado semilla, fue utilizado como el principal producto para alimentos, medicinas y aceite por poblaciones precolombinas (Cahill et al., 2003). En la actualidad, a medida que la conciencia sobre la salud pública y la demanda de alimentos funcionales con numerosos beneficios para la salud han aumentado (Mohd et al., 2012), las semillas de chía han recobrado popularidad. La misma contiene hasta 39% de aceite en sus semillas, con el mayor contenido conocido de ácido omega-3 (hasta 68%) en plantas cultivadas (Ayerza, 1995).

La chía crece naturalmente en ambientes tropicales y subtropicales. Dado que el mercado de la chía es rentable y favorable, su cultivo se está extendiendo rápidamente desde su centro de origen, en América Central, a nuevas áreas de cultivo como África, Australia, Europa y el resto de América, (Bochicchio et al., 2015). Además, debido a su alta adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas, la chía se considera un cultivo alternativo en términos de seguridad alimentaria y cambio climático (Silva et al., 2016).

1.1.1 Taxonomía, origen e historia

El género *Salvia* es el mayor y más importante de la familia Lamiaceae y uno de los más grandes del reino vegetal con cerca de 900 especies de distribución cosmopolita (Fernald et al., 1900; Stanley y Williams, 1973). Según la clasificación taxonómica propuesta por Linneo, la chía se encuentra dentro del Orden Lamiales, Familia Lamiaceae, Subfamilia Nepetoideae, Tribu Mentheae, Género *Salvia*, Especie *hispanica* (Ixtaina, 2010).

Los centros de diversidad taxonómica para el género se encuentran en la zona del mediterráneo (incluyendo el sur de Europa y oeste de Asia); en las serranías mexicanas (principalmente las sierras de las vertientes del Pacífico y el eje volcánico trans-mexicano) y en las montañas de Sudamérica. (Ramamoorthy, 1993).

Existen evidencias que sugieren que los aztecas utilizaron por primera vez la chía como alimento antes de 3500 años a.C. (Ayerza y Coates, 2005). Más tarde, entre 1500 y 900 años a.C., se cultivó en el centro de México como un cultivo comercial (Ayerza y Coates, 2005). En esa época fue uno de los alimentos básicos de varias civilizaciones centroamericanas, menos importante que el maíz y el poroto, pero más importante que el amaranto (Ayerza y Coates, 2004). Las civilizaciones precolombinas usaron la chía como materia prima para hacer

medicinas y compuestos nutricionales, e incluso pinturas. Dados sus múltiples usos fue usada por los aztecas como alimento de consumo directo, ya sea pura o mezclada con otros alimentos, en agua de bebida, molida como harina, incluida en medicinas, como alimento para aves o prensada para obtener su aceite (que se utilizaba como base para pinturas faciales y corporales, y para proteger estatuas y pinturas religiosas de los elementos climáticos) (Ayerza, 2005). La harina de chía puede almacenarse como reserva por muchos años, puede cargarse fácilmente en viajes largos y sirve como alimento enormemente energético. Los aztecas también ofrecían chía a los dioses durante las ceremonias religiosas (Ayerza y Coates, 2006).

1.1.2 Características morfológicas y reproductivas de la chía

La chía es una hierba anual que mide entre un metro y un metro y medio de alto. Los tallos son ramificados, de sección cuadrangular con pubescencias cortas y blancas. Las hojas son opuestas con bordes aserrados, tienen un peciolo de hasta cuarenta milímetros de largo, poca pubescencia blancuzca y muy corta, y miden de ochenta a cien milímetros de longitud y cuarenta a sesenta milímetros de ancho (Ayerza y Coates, 2006). Las flores pediceladas se encuentran reunidas en grupos de seis o más, en verticilos sobre el raquis de la inflorescencia. El cáliz es persistente, pubescente y bilabiado. La corola de color morado o azul, a veces blanco, es monopétala y bilabiada; el labio inferior se expande hacia afuera y abajo; el superior es ascendente y se arquea en forma de casco o gálea (Figura 1.1). El ovario es súpero, bicarpelar y tetralocular; en la base del ovario se encuentra un disco nectarífero. El estilo es glabro, glanduloso en la base y su estigma tiene dos ramificaciones; la más larga está excerta a la corola y la más corta se ubica entre las anteras. Tanto las anteras como el estigma están cubiertos y protegidos por la gálea. La característica diagnóstica de *Salvia* respecto de los otros géneros de Lamiaceae es la presencia de dos estambres fértiles (Wood et al., 1989; Stevens et al., 2001; Ramamoorthy et al., 2001; Pool et al., 2007) en los cuales la parte estéril del conectivo funciona como una palanca, lo que permite que el polen se adhiera a la cabeza o cuerpo de los polinizadores, principalmente abejas y colibríes (Walker et al., 2007).

No se conoce con precisión el mecanismo de polinización en *S. hispanica* L. Se ha supuesto que es una especie alógama y entomófila por el color de los pétalos, por la forma de pista de aterrizaje del labio inferior de la corola, por la articulación de los estambres a la corola y por la presencia de néctar en la base del ovario (Martínez et al., 1959; Ramamoorthy et al., 1985). Mann et al. (1959) asegura que la protandria en el género *Salvia* es el mecanismo responsable de evitar la autofecundación; por su parte, Haque y Ghoshal (1981) registran plantas androestériles en *S. hispanica* L. que obligan a cierto cruzamiento natural o baja producción de semilla en ausencia de polinizadores. El mecanismo de polinización en especies entomófilas del género *Salvia* descrito por Faegri y Pijl (1979) consiste en que las abejas se posan sobre el labio inferior de la corola y presionan hacia el nectario, esto produce la

inclinación de las anteras que depositan el polen en el dorso del insecto. El estigma es independiente de este mecanismo, pero con cierta frecuencia, se inclina y frota el dorso del insecto visitador. Otros autores refieren que la autofecundación puede estar presente en el género *Salvia*. Faegri y Pijl (1979) atribuyen la autofecundación a la cercanía del estigma y las anteras; Haque y Ghoshal (1981) indican que *S. hispanica* L. es autocompatible ya que se produce semilla aún en plantas aisladas, y que la autofecundación es debida a que las flores son muy pequeñas y homostílicas; Cahill (2004) reporta solo un 0,24% de cruzamiento natural entre una población silvestre y otra domesticada de *S. hispanica* L., pero la existencia de una progenie completamente fértil al realizar artificialmente estos cruzamientos intraespecíficos.

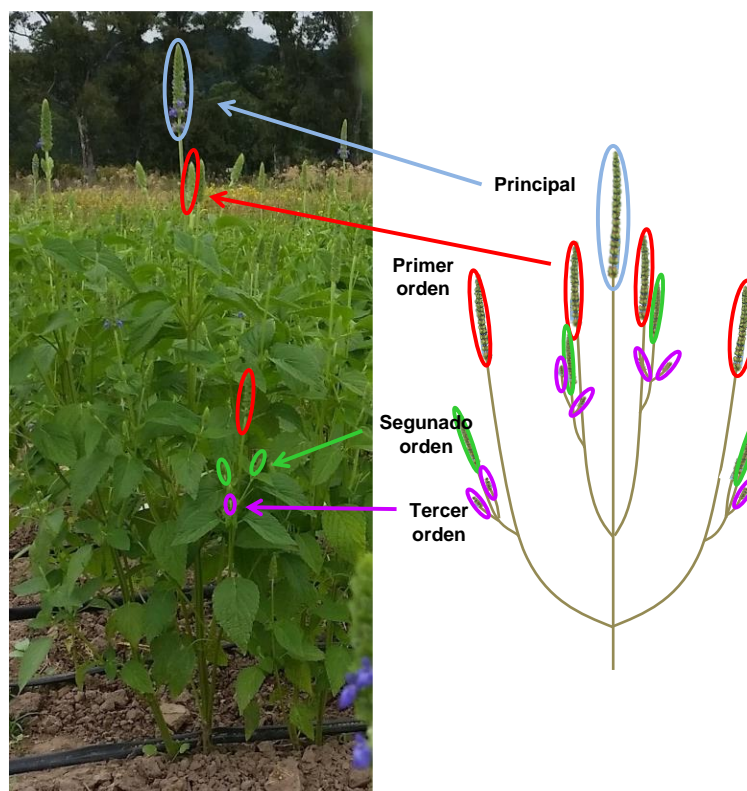


Figura 1.1. Foto y diagrama describiendo diferentes ordenes de ramas y verticilastros en chía (*Salvia hispanica* L.). Adaptado de Diez et al. (2021).

1.1.3 Importancia de la chía en la alimentación humana

Las dietas occidentales modernas se caracterizan por tener alta cantidad de ácidos grasos saturados y ácidos grasos polinsaturados omega-6, en detrimento del contenido de ácidos grasos omega-3 (Ayerza y Coates, 2005). En este sentido, los ácidos grasos omega-3 (como el ácido alfa-linolénico) se caracterizan por que ayudan a prevenir enfermedades cardiovasculares ya que disminuyen el colesterol LDL (Katan et al., 1994). Actualmente, la relación en la dieta entre los ácidos grasos omega-6: omega-3 varía entre diez y veinte a uno, mientras que durante el período Paleolítico éste ratio era de uno a uno, lo que constituye un

importante factor de riesgo conducente a una enfermedad cardiovascular (Minami et al., 1997).

Precisamente, la chía es una de las principales fuentes naturales de ácidos omega-3, tiene mayor contenido de proteínas, lípidos, energía y fibra, y menos contenido de carbohidratos que los tres principales cereales en los que la humanidad basa su alimentación (trigo, arroz y maíz). Además, tras la hidratación, el grano genera un mucílago que tiene importantes propiedades reológicas como retención de agua, adhesión y antioxidante, por lo que se están desarrollando innumerables aplicaciones alimenticias e industriales de la chía (Menga et al., 2017). Por ejemplo, se utiliza el mucílago de chía como sustituto de aceite en la carne de hamburguesa (Câmara et al., 2020), como gel sustituto del huevo en tortas (Rodríguez dos Reis Gallo et al., 2020) o como biofilm protector de drogas o alimentos (Urbizo-Reyes et al., 2020).

La Asociación Celíaca Argentina testeó la chía y corroboró la ausencia de gluten, por lo cual aprobó su uso en pacientes celíacos en los cuales el gluten está contraindicado (Ayerza y Coates, 2005). Además, la chía se diferencia de otras fuentes naturales de ácidos omega-3 en que la misma presenta muy bajo contenido en sodio, el cual se asocia a enfermedades como la hipertensión, las enfermedades cardiovasculares o los accidentes cerebrovasculares. Una porción comestible de cien gramos de chía contiene 1,8 veces menos sodio que las semillas de lino, 2,6 que una lata de atún en agua, 3,5 que el salmón rosado y 163 que las algas (*Schizochytrium sp.*) (Ayerza y Coates, 2005).

1.1.4 El cultivo de chía

La chía se produce principalmente en Bolivia, Argentina, Paraguay, México, Australia, Centroamérica, Perú, Ecuador y Colombia (Orona-Tamayo et al., 2017), con una superficie a nivel mundial que ha aumentado vertiginosamente hasta las 367.000 ha reportadas en 2015 (Peperkamp et al., 2015). En la actualidad, Argentina, Paraguay y Bolivia concentran cerca del 80% de la producción mundial, seguido por México, Nicaragua, Australia, Perú y Ecuador.

Es un cultivo relativamente nuevo para la agricultura moderna, con escasa variabilidad genética en poblaciones domesticadas (Cahill et al., 2004; Palma-Rojas et al., 2017) y escasa información que permita entender el proceso de generación del rendimiento (Bochicchio et al., 2015 a). En este sentido, se han desarrollado y publicado experimentos que reportan el efecto sobre el rendimiento y calidad de granos de diferentes prácticas de manejo agronómico como densidades de siembra y arreglo espacial del cultivo (por ej. Bochicchio et al., 2015 a; de Freitas et al., 2016; Grimes et al., 2018), fertilización nitrogenada (por ej. Bochicchio et al., 2015 a; Grimes et al., 2018), riego (por ej. Silva et al., 2018; Escobar et al., 2018) y fechas de siembra (Goergen et al., 2018; Win et al., 2018; Benetoli da Silva et al., 2020). Sin embargo,

ninguno de esos estudios buscó entender procesos fisiológicos que se encuentran detrás de la generación del rendimiento, de manera tal de aportar conocimiento básico esencial para el diseño de prácticas de manejo y/o estrategias de mejoramiento genético.

En Argentina, es un cultivo de ciclo estivo-otoñal que puede resultar alternativa de diversificación para sistemas de monocultivos como el maíz, la soja, el poroto o el tabaco. La chía se cultiva fundamentalmente en la región Noroeste de Argentina (NOA), ya que esta región presenta características ambientales que favorecen el crecimiento y desarrollo de este cultivo tales como períodos libres de heladas y clima monzónico (período lluvioso desde octubre a mayo y período seco desde junio a octubre) (Coates y Ayerza, 1998). Las áreas de cultivo más propicias están ubicadas en la zona que se extiende desde el norte de Santiago del Estero hacia el norte del país y desde Catamarca hasta el oeste de Formosa. Existen además experiencias bajo riego en el norte de Córdoba y en el sur de la provincia de Buenos Aires. El piso de producción actual en Argentina es de 30.000 ha con rendimientos a campo que varían de 500 a 1200 kg ha⁻¹ (Coates y Ayerza, 1998).

Dentro de los sistemas productivos característicos del NOA, las mejores condiciones en materia de productividad y calidad se dan en las áreas de cultivo con mayor amplitud térmica como el pedemonte tucumano, el Valle de Lerma en Salta y pequeñas áreas de Catamarca (Scalise, 2014). En estas zonas, la producción se realiza en explotaciones capitalizadas, pero de pequeña extensión, donde la superficie cultivada oscila generalmente entre las 50 y 100 ha distribuidas en parcelas no contiguas de entre 10 y 20 ha. Otra zona de producción, con su impronta de cultivo extensivo y mayores superficies cultivadas, se ubica en el norte de Salta en los departamentos de Gral. José de San Martín, Orán y Anta, el este de Jujuy y el oeste de Formosa. En estos casos, la implantación se define por la necesidad de cubrir parte de la inversión realizada en la siembra fallida de los cultivos tradicionales de la zona como el poroto y la soja. Es decir, que el calendario de siembra de estos cultivos permite la resiembra de chía en los mismos lotes previamente sembrados con soja o poroto, como forma de recuperar el costo de los insumos aplicados como herbicidas pre-emergentes (Scalise, 2014).

1.1.5 Mercados y comercialización de la chía

Debido a que es la fuente natural más importante de ácidos grasos omega-3 para el hombre (Orona-Tamayo et al., 2017), en el último lustro su demanda global se ha incrementado en 239% anual (Cassiday, 2017).

En este sentido, Scalise (2014) reportó que, la producción mundial de chía hacia el año 2025 dependerá fuertemente de que la demanda siga creciendo, proyectando un volumen máximo de producción de 2,7 millones de toneladas. A su vez, debido a mejoras en los sistemas

productivos de chía, proyectó que para alcanzar dicha producción se requerirá un 36% menos de hectáreas (2,46 millones de hectáreas).

Las exportaciones mundiales de chía totalizan más de 36.000 toneladas anuales por un valor de US\$ 142,7 millones. Se observa que Bolivia, Paraguay y Argentina reúnen algo más de dos tercios de las exportaciones mundiales (Scalise, 2014).

En Argentina, el consumo interno de chía es insignificante en relación con la producción. De las 48.000 toneladas estimadas producidas durante el año 2014, solo 150 se destinaron al consumo directo en forma de semilla y otras 350 a la producción de 70.000 litros de aceite. El resto de la producción se destinó a la exportación, aunque no siempre las operaciones son registradas en las estadísticas oficiales. El movimiento de granos desde los campos a los galpones de limpieza, clasificación y acopio no exige carta de porte, y algunas fuentes señalan una alta informalidad en la comercialización del producto, que podría cruzar las fronteras con Paraguay o Brasil en forma clandestina (Scalise, 2014).

1.2 Variables ambientales que regulan el crecimiento y desarrollo de los cultivos: temperatura, fotoperíodo y vernalización

1.2.1 Marco teórico general

El desarrollo se ha definido como una secuencia progresiva de eventos fenológicos que ocurren a lo largo del ciclo del cultivo y que son controlados por factores externos (medio ambiente) e internos (genéticos). Cada evento desencadena cambios importantes en la morfología y/o función de algunos órganos (Landsberg, 1977).

Las principales variables del medio ambiente que afectan el desarrollo de los cultivos son la temperatura, el fotoperíodo y la vernalización (Piratesh y Welsh, 1980; Fischer, 1984). Existe amplia información de que otros factores como el nivel de nutrición, la disponibilidad de agua, la densidad de las plantas, la radiación (Evans et al., 1987; Rawson et al., 1993) y la concentración de CO₂ (Rawson et al., 1992) pueden modificar las respuestas de desarrollo, pero estos efectos son relativamente de menor importancia que el de los factores ambientales mencionados. A su vez, el componente genético juega un rol importante en este tipo de respuestas, existiendo diferencias a nivel de especie y/o variedad es que difieren en su sensibilidad a los factores mencionados y también parecen diferir en sus tasas intrínsecas de desarrollo (Halloran y Boydell, 1967; Halloran, 1976, Major et al., 1980; Flood y Halloran, 1984 a).

Para describir el efecto de los factores ambientales sobre el desarrollo, además de analizar los cambios en la duración de las fases, suele utilizarse como variable de análisis la tasa de desarrollo, que representa la velocidad o ritmo con el que progresa el desarrollo a lo largo de

la ontogenia. La tasa de desarrollo puede estimarse como la recíproca de la duración (días⁻¹), por lo que cada vez que se produce un aumento en la tasa de desarrollo, significa que el tiempo entre dos estados de desarrollo disminuye, y viceversa. Estimar el desarrollo mediante la tasa de desarrollo resulta útil para modelizar algunas respuestas y estimar parámetros para cuantificar el comportamiento del cultivo con fines predictivos (Kantolic et al., 2008) (Figura 1.2).

La temperatura ha sido y es considerada como el principal factor ambiental que determina la tasa de desarrollo del cultivo, ya que todas las plantas y procesos de desarrollo son sensibles a ella (Midmore et al., 1982; Ong et al., 1983; Johnson y Thornley, 1985; Frank et al., 1987, 1988; Porter y Delecolle, 1988; Morrison et al., 1989). Es ampliamente reconocido que, en cierto rango de temperaturas (que depende de cada especie), el desarrollo se acelera a medida que aumenta la temperatura, existiendo relaciones entre la tasa de desarrollo y la temperatura media para el período de desarrollo considerado (Gallagher, 1979; Angus et al., 1981; Monteith, 1977; Garcia-Huidobro et al., 1982; Rickman, 1983; Ketring y Wheless, 1989; Morrison et al., 1989; Squire, 1989a, b; Slafer y Savin, 1991). Dentro de la respuesta del desarrollo de las plantas a la temperatura, se deben considerar las temperaturas base (T_b), óptima (T_o) y máxima (T_m) de desarrollo. La T_b es la temperatura en la que la tasa de desarrollo es cero; para que haya desarrollo la temperatura media debe ser mayor a T_b . La tasa de desarrollo aumenta linealmente con temperaturas entre T_b y T_o y vuelve a declinar - más o menos linealmente- en el rango entre T_o a T_m . Si la temperatura ambiente es inferior a T_b o superior a T_m , el desarrollo prácticamente se detiene y la duración de la fase tiende a ser infinita (Figura 1.2).

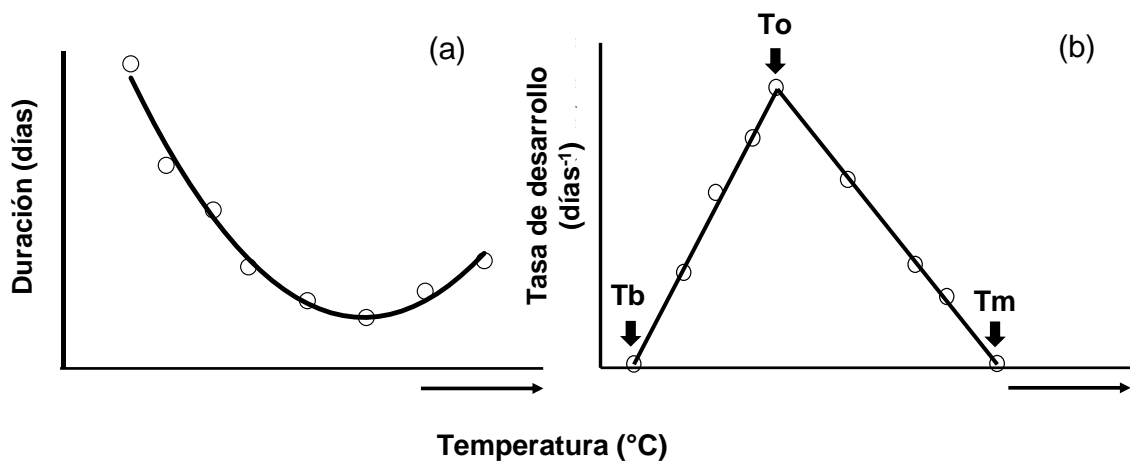


Figura 1.2. Respuesta idealizada de (a) la duración de una fase fenológica y (b) su inversa (la tasa de desarrollo) de un cultivo ante diferentes temperaturas. T_b , T_o y T_m representan las temperaturas base, óptima y máxima de desarrollo, respectivamente. Adaptado de Andrade y Sadras (2002).

Como se mencionara precedentemente, la respuesta de las plantas a la temperatura es universal, esto quiere decir que no existe insensibilidad a este factor, por lo que todas las plantas y todos los procesos de desarrollo son sensibles a la misma. Éste hecho permite considerar la duración del ciclo de los cultivos (y de sus etapas) en unidades que ponderan el tiempo calendario; esas unidades se conocen como tiempo térmico (TT) (Monteith, 1977). El tiempo térmico también es una herramienta útil para analizar los efectos de otros factores ambientales sobre el desarrollo de los cultivos. En este sentido, permite visualizar el efecto del fotoperíodo y/o la vernalización (para el caso de aquellos cultivos que la presentan) cuando la temperatura no puede mantenerse sin modificaciones, como en los experimentos de campo. Debido a que la vernalización (adquisición o aceleración de la capacidad de florecer en respuesta a un período de exposición al frío; Chouard, 1960) es un fenómeno característico de cereales invierno-primaverales (Satorre et al., 2003), en esta tesis no se aborda su efecto en el desarrollo de la chía.

A diferencia del efecto universal de la temperatura que puede generalizarse a través de un modelo sencillo, las respuestas al fotoperíodo son más complejas ya que varían con la especie y con el estado de desarrollo. El fotoperíodo no presenta una respuesta universal y se caracteriza por modificar la suma térmica requerida para cumplir con un determinado evento de desarrollo (Summerfield et al., 1993). Es posible describir las respuestas fotoperiódicas en dos grandes grupos, cualitativas y cuantitativas. En una respuesta cualitativa es necesario superar un valor de umbral fotoperiódico crítico para que se desencadene el pasaje hacia una determinada etapa de desarrollo, mientras que la respuesta cuantitativa asume cambios graduales que permiten clasificar a las plantas en cuantitativas de días largos (PDL) o de días cortos (PDC) (Figura 1.3). Las PDL son aquellas que no florecen o retrasan la floración si el fotoperíodo está por debajo de un valor umbral crítico, mientras que las PDC son aquellas que no florecen o retrasan su floración si el fotoperíodo se encuentra por encima de un valor umbral crítico (Roberts y Summerfield, 1987). La mayoría de especies cultivadas presentan comportamiento cuantitativo, ya sea PDL o PDC.

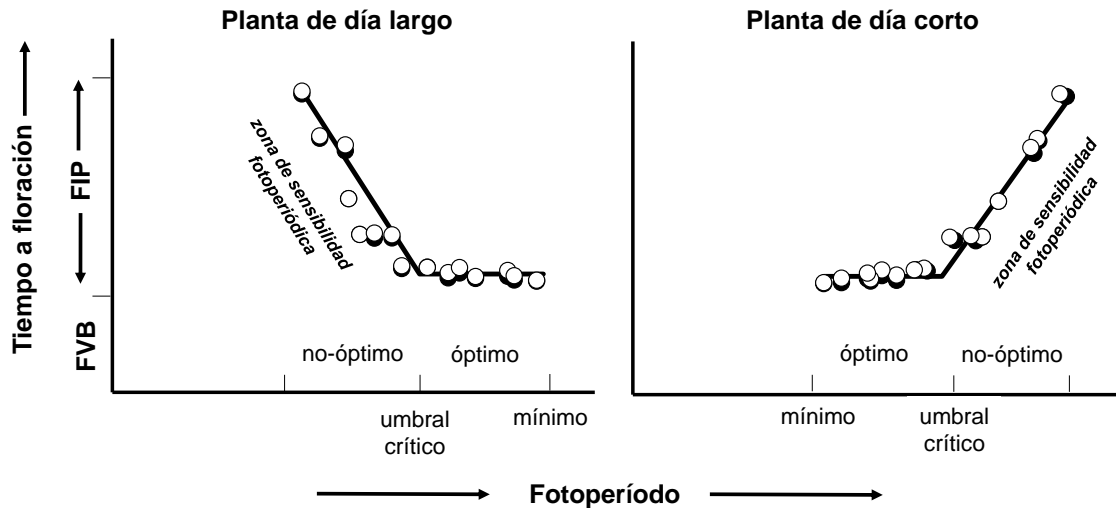


Figura 1.3. Respuestas cuantitativas de plantas de días largos y plantas de días cortos al fotoperíodo. FIP: fase inductiva al fotoperíodo. FVB: fase vegetativa básica. Adaptada de Major y Kiniry (1991).

Independientemente de si se trate de una PDL o PDC, por lo general los efectos fotoperiódicos son más aparentes en la duración de la fase vegetativa que en la duración del período reproductivo. La fase vegetativa suele dividirse en una fase juvenil (su presencia depende de la especie) y otra fase inductiva. La duración de la fase juvenil es independiente del fotoperíodo, mientras que la duración de la fase inductiva está sujeta a control fotoperiódico. La duración mínima desde emergencia hasta inicio de iniciación floral se denomina fase vegetativa básica (FVB) y resulta de la suma de la fase juvenil (en caso de estar presente) y la fase inductiva cuando el fotoperíodo es óptimo. Fotoperíodos no óptimos aumentan la duración de la fase inductiva en función de la sensibilidad fotoperiódica del cultivar. Ésta sensibilidad puede ser descrita como los días (o TT) de retraso en el desarrollo por unidad de aumento o disminución del fotoperíodo (Major and Kiniry, 1991) (Figura 1.3).

Dentro de los principales cultivos de grano, el maíz (*Zea mays* L.) y la soja (*Glycine max* L. [Merr.]) son PDC, mientras que el trigo (*Triticum aestivum* L.) una PDL. El maíz es sensible al fotoperíodo en los días previos al inicio de la panoja, presentando en la fase post-inductiva solo control térmico (Kiniry et al., 1983), mientras que la soja presenta control fotoperiódico tanto en la fase inductiva (Summerfield et al., 1991) como post-inductiva (la sensibilidad al fotoperíodo continúa por el resto del ciclo del cultivo) (Raper y Kramer, 1987; Grimm et al., 1994). En el caso del trigo, la influencia fotoperiódica ocurre desde la emergencia a floración, no presentando sensibilidad al fotoperíodo durante el llenado de granos (Miralles y Slafer, 1999).

1.2.2 Efecto de la temperatura y el fotoperíodo sobre la duración de las fases de desarrollo

Como resultado de la sensibilidad de cada cultivo a las condiciones imperantes de temperatura y fotoperíodo, se producen cambios en la tasa de desarrollo del cultivo y consecuentemente en la longitud de las distintas fases fenológicas de los cultivos a lo largo de su ciclo. El conocimiento de estas respuestas permite diseñar estrategias de manejo de la fecha de siembra para que aquellos eventos o períodos claves en la determinación del rendimiento coincidan con las condiciones ambientales más favorables para el desarrollo y crecimiento del cultivo (Slafer y Rawson, 1994).

Temperaturas altas aceleran el desarrollo de la etapa vegetativa en maíz (*Zea mays* L.) (Cirilo y Andrade, 1992), girasol (*Helianthus annuus* L.) (Goyne et al., 1989) y soja (*Glycine max* L. [Merr.]) (Major et al., 1975), mientras que los días largos reducen la tasa de desarrollo hasta floración en maíz y soja, y tienen efectos variables en girasol. En estos cultivos, el efecto térmico prevalece por sobre el fotoperiódico en la etapa vegetativa, por lo que retrasos en la fecha de siembra acortan dicha etapa. La duración del período de floración a madurez fisiológica también es función inversa de la temperatura en maíz (Cirilo y Andrade, 1996), girasol (Ploschuck y Hall, 1995) y soja (Major et al., 1975). Se destaca que, en soja, el desarrollo reproductivo es acelerado como consecuencia de fotoperíodos acortándose, prevaleciendo este efecto por sobre el de la temperatura (Major et al., 1975).

En los cereales de invierno como el trigo pan (*Triticum aestivum* L.) y la cebada (*Hordeum vulgare* L.), y en oleaginosas como la colza (*Brassica napus* L.), la duración del período desde emergencia hasta antesis está asociado lineal y negativamente con el retraso en la fecha de siembra (Hay et al., 1989; Miralles et al., 2001), ya que este retraso genera una mayor tasa de desarrollo por las mayores temperaturas y más largos fotoperíodos que se registran durante las etapas vegetativas (Angus y Daynard, 1976; Fisher et al., 1985; Slafer y Rawson, 1994, 1995; Miralles et al., 2001). Es decir, existe un efecto sinérgico de la temperatura y el fotoperíodo en la reducción de ésta sub-fase de desarrollo. Existen evidencias de que el fotoperíodo podría afectar también la duración de la fase de iniciación de flores (etapa reproductiva temprana) (Allison y Daynard, 1976; Connor et al., 1992; Masle et al., 1989; Slafer y Rawson, 1996; Miralles et al., 2001), pero no se encontraron respuestas al fotoperíodo durante el llenado de los granos (Miralles y Slafer, 1998).

Más allá de las respuestas teóricas y características de las plantas (PDL y PDC) a la temperatura y al fotoperíodo, las evidencias demuestran que existe amplia variabilidad a nivel de especie y variedades en dichas respuestas. En este sentido, es de esperar que la chíca

presente respuestas propias en cuanto a umbrales y sensibilidad a dichos factores que caractericen su desarrollo.

1.2.3 Duración de las fases y su relación con los componentes asociados al rendimiento

Las evidencias anteriores demuestran que los cambios en la duración de las fases de desarrollo del ciclo de los cultivos se asocian, en gran medida, a variaciones en factores ambientales tales como la temperatura y el fotoperíodo. Estos cambios en la duración de fases generan, a su vez, cambios en la diferenciación y generación de estructuras vegetativas y reproductivas que, en último término, modifican el rendimiento del cultivo.

En trigo, se encontró una relación positiva significativa entre el número de flores fértiles por espiga y la longitud de la fase de elongación del tallo. Dado que el número de flores fértiles presenta una íntima relación con el número de granos potenciales a cosecha (Miralles et al., 2001), al aumentar la duración de la fase de elongación del tallo (exponiéndola a fotoperíodos cortos) se pueden producir mayor cantidad de flores fértiles y, por ende, mayor cantidad de granos a cosecha (Gonzalez et al., 2003).

En cebada, la relación entre las espiguillas fértiles por espiga y la duración del período comprendido entre el máximo número de primordios de espiguilla y floración también es positiva. Sin embargo, a diferencia del trigo, esta relación ocurre de manera lineal solo durante un rango limitado de duración en términos de tiempo térmico (alrededor de los 450 °Cd), con un aumento menor en el número de flores fértiles por espiga cuando se supera umbral (Miralles et al., 2001).

Thurling (1980) reportó variación en el rendimiento de la semilla de colza asociada principalmente con diferencias en la duración de la fase de elongación del tallo, lo que resultó en la producción de un mayor número de flores (y vainas) por planta y, en última instancia, un mayor número de semillas por planta.

En el cultivo de soja se ha demostrado que fotoperíodos largos alargan las fases de pre- y post-floración. En el primer caso, se retrasa la iniciación floral (Hadley et al., 1984; Caffaro y Nakayama, 1988) promoviendo la diferenciación y aparición de mayor cantidad de nudos (determinante del rendimiento) (Caffaro et al., 1988; Thomas y Kanchanapoom, 1991); en el segundo caso, aumentando la biomasa y el rendimiento por planta (Ellis et al., 2000) a través de la reducción de la tasa de crecimiento del grano (Morandi et al., 1990). Estos comportamientos característicos de la soja fueron posteriormente corroborados en ensayos a campo por Kantolic y Slafer (2001).

Las evidencias reportadas en numerosos artículos demuestran que existen asociaciones entre la duración de etapas de desarrollo particulares y los componentes del rendimiento (tanto de pre- como de post-floración; Rawson 1970, 1971; Rawson y Bagga, 1979) que repercuten en el rendimiento (por ejemplo, Rawson 1987; Craufurd y Cartwright, 1989). Por lo tanto, diseñar estrategias de manejo orientadas a mejorar la oferta ambiental para que coincida con etapas definidas del proceso de la generación del rendimiento (período crítico) podría resultar novedoso en el cultivo de chíá.

1.2.4 Respuestas a la temperatura y al fotoperíodo de la chíá

Pocos estudios han reportado respuestas de la chíá al termo-fotoperíodo. Jamboonsri et al. (2012) reportaron que el germoplasma de chíá domesticado tiene un comportamiento característico de PDC, con un requerimiento de fotoperíodo inferior a 12 horas para la inducción floral. Aumentos del fotoperíodo más allá de las 12 horas generan retrasos en la inducción floral. A su vez, trabajando con mutagénesis, estos autores desarrollaron plantas de chíá capaces de florecer bajo fotoperíodos mayores a 14 horas, por lo que este cultivo tiene un potencial significativo para expandir el rango de producción a regiones templadas. Las nuevas líneas de chíá han alterado su umbral de inicio de la floración, pero mantienen la uniformidad en la maduración necesaria para climas templados, donde los riesgos de heladas tempranas son asegurados.

El único trabajo publicado en chíá que modifica la duración del fotoperíodo mediante cambios en la fecha de siembra fue realizado por Baginsky et al. (2016). Estos autores demostraron que la chíá necesita 500 °Cd para alcanzar el comienzo de la floración cuando el fotoperíodo era igual o inferior a 11,8 horas (umbral crítico del fotoperíodo). Si la duración del día se encuentra fuera de la zona óptima (mayor cantidad de horas de luz que el umbral crítico), las plantas comienzan a florecer con mayor requerimiento de acumulación térmica, por lo que alargan el período de pre-floración. La sensibilidad al fotoperíodo para el período entre emergencia y floración reportada en este estudio es de 200 a 300 °Cd por hora de alargamiento en el fotoperíodo.

Es evidente la escasa información respecto de la respuesta de la chíá al termo-fotoperíodo. Además, los escasos estudios realizados presentan alto grado de incertidumbre ya que los mismos no se ajustan a un modelo matemático que permita determinar con precisión el umbral crítico de inicio de la floración, por lo que sus determinaciones son más cualitativas que cuantitativas. Por otro lado, en esos estudios el período de pre-floración se consideró como una sola etapa y se ha demostrado que las fases de pre-floración en varios cultivos muestran diferentes sensibilidades al fotoperíodo (por ejemplo, Miralles et al., 2001; Whitechurch et al., 2007).

1.3 Incidencia de las condiciones ambientales sobre el rendimiento y calidad

El rendimiento y la calidad de los cultivos son el resultado de complejas interacciones que se producen entre éstos y el ambiente en el que crecen (Kantolic et al., 2008). El mismo debe ser concebido como un proceso secuencial que se va definiendo a lo largo del ciclo del cultivo (Kantolic et al., 2008). El rendimiento de un cultivo es el atributo en el cual los programas de mejoramiento y las decisiones de manejo normalmente concentran sus esfuerzos. Entender cómo se genera el rendimiento potencial en el cultivo desde un punto de vista ecofisiológico resulta necesario para encontrar alternativas que permitan incrementarlo (González, 2005). Debido al aumento en la demanda de productos de alta calidad, la mejora de la calidad del producto cosechado pasó a ser también otro de los principales objetivos de las investigaciones agronómicas (Izquierdo y Aguirrezábal, 2015).

El estudio del rendimiento tradicionalmente se realiza utilizando dos enfoques diferentes, pero complementarios. Uno de ellos es a través de los componentes del rendimiento y otro, analiza la eficiencia para interceptar y utilizar la radiación (Slafer, 2004). A partir del enfoque basado en los componentes del rendimiento se ha determinado que, para distintos ambientes y cultivares, el rendimiento está más asociado al número de granos logrados por unidad de superficie que al peso medio de los mismos (Fischer, 1985; Slafer y Savin, 1991; Slafer et al., 1994; Egli, 1998). A su vez, el número de granos por unidad de superficie se asocia a sub-componentes del mismo que, por ejemplo, para en el caso del trigo, son el número de plantas por unidad de superficie, el número de espigas por planta, el número de espiguillas por espiga y el número de granos por espiguilla (Slafer y Rawson, 1994a).

El otro enfoque utilizado se basa en cómo el cultivo intercepta y utiliza la radiación para acumular la biomasa total y la partición de ésta hacia los distintos órganos de la planta en crecimiento. Históricamente, en cultivos sometidos a mucha presión de selección como es el caso del trigo, la partición de la biomasa total a granos o índice de cosecha fue el principal rasgo fisiológico que explicó los cambios en el número de granos por unidad de superficie y el rendimiento (Slafer, 2004). El uso de este enfoque requiere orientarse en el crecimiento/partición durante la “ventana” del tiempo fenológico denominada “*periodo crítico*” cuando se ha encontrado que el rendimiento del cultivo responde marcadamente a los cambios ambientales.

En ciertos cultivos resulta de interés conocer qué proporción del rendimiento corresponde a los productos que definen su utilización. De esta manera, los kilogramos de aceite producido por los granos del girasol, por ejemplo, reflejan más fidedignamente su rendimiento a nivel económico (Kantolic et al., 2008). En este sentido, las condiciones ambientales y de

crecimiento durante el llenado de granos generan cambios en la cantidad total de aceite sintetizado por grano y en el perfil de ácidos grasos de una amplia gama de cultivos (Irving et al., 1988; Andrade y Ferreiro, 1996; Izquierdo et al., 2009, 2017; Schulte et al., 2013). En girasol (Izquierdo et al., 2002, 2006), colza (Deng y Scarth, 1998) y soja (Rebetzke et al., 1996; Kane et al., 1997), el porcentaje de ácido oleico aumentó con el aumento de la temperatura (principalmente temperatura nocturna). La radiación interceptada durante el llenado de granos también altera la producción total de aceite y la composición de ácidos grasos durante el llenado de granos (Harwood, 1994; Williams et al., 1999). La reducción de la radiación interceptada en girasol redujo la concentración de aceite (Aguirrezábal et al., 2003) y cambió el perfil de ácidos grasos (Izquierdo et al., 2009). En general, los aumentos de temperatura y/o de la radiación interceptada aumentaron el porcentaje de ácido oleico a expensas de los ácidos grasos poliinsaturados (Izquierdo et al., 2009).

1.3.1 Respuesta del rendimiento y calidad de la chía a factores ambientales

Si bien existe escasa información respecto a la incidencia de variaciones ambientales en el rendimiento y calidad de la chía, Diez et al. (2021) reportó que este cultivo posee un amplio período crítico (550 °Cd antes de floración hasta 250 °Cd post-floración) para determinación del rendimiento, lo que hace suponer que variaciones en la temperatura, radiación y/o fotoperíodo incidirán fuertemente en el rendimiento. A su vez, demostró que el rendimiento se asocia al número de granos a través de sus dos sub-componentes: el número de verticilastos y el número de granos por verticilastro.

En cuanto a la calidad de los granos, resultados obtenidos en diferentes lugares y años dieron lugar a diferencias en las concentraciones de ácido oleico, linoleico y linolénico, lo que indica que el perfil de ácidos grasos de la chía estuvo influenciado por factores ambientales (Ayerza, 2009; Ayerza y Coates, 2011). Cabrera-Santos et al. (2021) informaron que las concentraciones más altas de todos los ácidos grasos, excepto el ácido oleico, se observaron a 20 °C. Sin embargo, no se han realizado investigaciones sobre el impacto de las condiciones ambientales durante el llenado del grano en la composición de ácidos grasos de las semillas de chía.

1.4 Declaración del problema

La temperatura y el fotoperíodo son los factores ambientales que tienen mayor incidencia sobre el desarrollo de los cultivos de interés (cereales de invierno, maíz, soja, girasol). Estos factores son importantes a tal punto que algunas de las cuestiones agronómicas básicas -qué, cómo y cuándo sembrar- están directamente dictadas por los requerimientos térmicos y fotoperiódicos de los cultivos. Estos factores son determinantes en la longitud de ciertas

etapas del ciclo de los cultivos, las cuáles modifican la generación de estructuras vegetativas (ramas y hojas) o reproductivas (flores) que repercuten en el rendimiento potencial del cultivo.

“El conocimiento de los procesos y mecanismos determinantes del desarrollo, crecimiento y generación del rendimiento de los cultivos en nuestros ambientes es necesario para aumentar la producción de manera sostenible, ya que nos orienta en la elección de las prácticas de manejo más apropiadas, brinda información para un manejo eficiente y adecuado de los insumos, y guía al mejorador en la selección de genotipos de mayor potencial de rendimiento y más adaptados al ambiente” (Andrade et al., 2002).

En los cultivos de mayor relevancia a nivel mundial (como la soja, el maíz, el girasol, el trigo y otros cereales de invierno), estudios relacionados al desarrollo de los mismos han sido ampliamente reportados. La relación entre la fenología, el desarrollo y el rendimiento, así como las bases genéticas que controlan las respuestas de éstos cultivos a los factores ambientales, son ampliamente conocidos (Kantolic et al., 2008).

En soja, por ejemplo, se ha determinado que un acortamiento del período de pre-floración manteniendo la duración total del ciclo (es decir, un alargamiento de las fases de post-floración a expensas de un menor tiempo a floración) incrementa el rendimiento en un amplio rango de latitudes y condiciones ambientales (Kantolic et al., 2007). Las bases funcionales de esta respuesta parecen subyacer en la ocurrencia de las fases de floración y fructificación bajo condiciones de alta radiación, alta temperatura y fotoperíodos largos que permiten lograr una alta tasa de crecimiento del cultivo durante un largo período crítico, lo que conduce a un mayor crecimiento durante esta fase y, consecuentemente, un mayor logro de granos. Cuando las condiciones nutricionales o hídricas no son óptimas, el área foliar y la producción de nudos por planta pueden volverse limitantes. Por lo tanto, aumentar la duración de la fase de producción de nudos puede incrementar los rendimientos (Kantolic et al., 2007).

En trigo, arroz, colza y cebada, se vio que para maximizar el crecimiento de la espiga (vaina para colza), una posible alternativa consistía en optimizar las duraciones relativas de las etapas de pre-antesis del ciclo del cultivo. Halloran y Pennell (1982) sugirieron que las duraciones de las etapas de desarrollo parecerían ser independientes, indicando la posibilidad de ajustar la duración de una etapa sin efectos compensatorios importantes en las otras. Basándose en esta sugerencia, y reconociendo la importancia de la etapa reproductiva tardía en el peso final de la espiga (o vaina) en antesis, se ha sugerido que el rendimiento potencial podría incrementarse aumentando la duración de dicha etapa (Slafer et al., 1996, 2001). Desde el punto de vista fenológico, el incremento en la duración de la etapa reproductiva tardía permitiría acumular mayor radiación interceptada durante dicha etapa, aumentando de

esta forma el peso de la espiga que está creciendo activamente y que repercutirá en el rendimiento potencial del cultivo.

La evidente utilidad de este tipo de estudios, y la carencia de los mismos en chíá, remarcán la necesidad de generar conocimiento novel que permita disminuir la incertidumbre para diseñar prácticas de manejo y estrategias de mejoramiento genético en este cultivo. Para que este vacío en el conocimiento del cultivo de chíá pueda ser sorteado y la estrategia de maximizar los rendimientos a expensas de modificaciones en las duraciones relativas de las etapas de pre-antesis den resultado, es necesario: (i) entender el impacto de las principales variables ambientales (temperatura y fotoperíodo) sobre la duración de las distintas etapas de pre-antesis del ciclo del cultivo, (ii) inferir sobre la posible existencia de respuestas relativamente independientes de la duración de las etapas de pre-antesis a dichas variables ambientales, y (iii) determinar si existen relaciones entre la duración de estas etapas y los componentes tempranos (en floración) o a cosecha del rendimiento.

1.5 Objetivos e hipótesis

1.5.1 Objetivo general

Determinar las respuestas, en términos de crecimiento y desarrollo, del cultivo de chíá a variaciones en la temperatura y el fotoperíodo.

1.5.2 Objetivos específicos

- Construir una escala específica para una descripción fenológica simple basada en caracteres morfológicos comunes de chíá.
- Establecer las temperaturas base, óptima y máxima, es decir las temperaturas cardinales de crecimiento y desarrollo de la chíá.
- Determinar las principales respuestas de crecimiento y desarrollo de la chíá a variaciones termo-fotoperiódicas y el momento en que estas ocurren.
- Determinar el tipo de respuesta de la chíá al fotoperíodo.
- Determinar como los principales componentes del rendimiento (en cantidad y calidad) de la chíá se ven afectados ante variaciones del ambiente.

1.5.3 Hipótesis

El cultivo de chíá presenta condiciones óptimas para su crecimiento y desarrollo, las cuales están influenciadas por la temperatura y el fotoperíodo, factores ambientales determinantes de la duración de fases de diferentes cultivos. A su vez, en la Argentina existen dos poblaciones comerciales diferentes de chíá, las que se caracterizan por diferir en el color de

flores y granos. De este modo, podemos pensar que existirán diferencias entre ambas poblaciones en cuanto a sus atributos ecofisiológicos que incidirán en el desarrollo y generación del rendimiento del cultivo, tanto en cantidad como en calidad de sus granos.

Hipótesis A: La temperatura y el fotoperíodo tienen incidencia en la duración de las fases que van (i) desde la emergencia hasta inducción floral, (ii) desde la inducción floral a la aparición del verticilastro y (iii) desde la aparición del verticilastro hasta la floración.

Hipótesis B: Las variaciones en la duración de las fases en pre-floración generan alteraciones en el rendimiento, donde cuanto mayor sea la duración relativa de las fases (ii) o (iii) mayor será el rendimiento.

Hipótesis C: Las poblaciones de chía estudiadas se diferencian entre sí en crecimiento y desarrollo por su respuesta a dichas variables ambientales en las diferentes fases de pre-floración, lo que incide en el proceso de generación del rendimiento.

Hipótesis D: Las condiciones ambientales imperantes durante el llenado de los granos inciden en la calidad del grano, dándose que mayores temperaturas y radiación capturada en este período conducen a mayor calidad de los granos de chía.

1.6 Justificación del estudio

La tesis consta de cuatro capítulos, uno introductorio y tres de resultados de ensayos nóveles, y un apartado de conclusiones y posibles líneas futuras de trabajo. El Capítulo 1 describe la planta y el cultivo de chía, y en el mismo se plantea la carencia en el conocimiento que llevan a postular las hipótesis que fueron puestas a prueba. Este capítulo realiza una revisión de los avances en el conocimiento en cultivos mayores en cuanto la respuesta a la temperatura y al fotoperíodo, la duración de fases y el efecto de estos sobre el rendimiento. El Capítulo 2 establece una escala fenológica estandarizada para este cultivo, requisito fundamental para avanzar en aspectos de desarrollo en el resto de la tesis. Se describe por primera vez los principales estados de crecimiento de la chía en una escala fenológica de acuerdo a la normativa de la Biologische, Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical Industry (BBCH). El Capítulo 3 explora, mediante cambios en la fecha de siembra, como la variación en las condiciones de temperatura y fotoperíodo a las que es expuesto el cultivo modifica la duración de las etapas de pre-floración del cultivo. En este capítulo se reportan cambios en el número final de hojas y en el filocrono, que podrían explicar los cambios en la duración de dichas etapas. Además, se intenta establecer que componentes tempranos (en floración) o a cosecha del rendimiento se ven afectados por los cambios en la duración de las etapas. En este capítulo, se presentan también los resultados de un ensayo que permitió determinar las temperaturas cardinales de desarrollo del cultivo para el uso correcto del modelo del tiempo

térmico. El Capítulo 4 analiza el proceso de generación del rendimiento del cultivo, tanto en cantidad como en calidad de los granos. Para ello utiliza un modelo que considera la generación y partición de la biomasa y un modelo de determinación de los componentes del rendimiento. Aborda aspectos de la calidad de los granos, principalmente del perfil lipídico, y como las condiciones ambientales inciden en la misma. El último apartado concluye sobre los principales aportes realizados por esta tesis. El mismo plantea posibles alternativas para continuar el estudio de esta tesis, aportando nuevas ideas y enfoques experimentales que permitan en el futuro efectivamente mejorar el rendimiento potencial del cultivo de chía a través de los mecanismos aquí estudiados.

1.7 Bibliografía

- Aguerrizábal L. et al., 2003. Intercepted solar radiation during seed filling determines sunflower weight per seed and oil concentration. *Crop Sci.* 43:152–161.
- Allison, J. C. y Daynard, T. B., 1976. Effect of photoperiod on development and number of spikelets of a temperate and some low-latitude wheats. *Ann. Appl. Biol.* 83: 93-102.
- Andrade F. H y Ferreiro M., 1996. Reproductive growth of maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops. Res.* 48: 155-165.
- Andrade F. y Sadras V. (Editores), 2002. “Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja”, 450 páginas. I.S.B.N.: 987-521-047-1.
- Angus, J. F., Cunningham, R. B., Moncur, M. W. y MacKenzie, D. H., 1981. Phasic development in field crops. I. Thermal response in the seedling phase. *Field Crops Research*, 3, 365-378.
- Ayerza, R., 1995. Oil content and fatty acid composition of chia (*Salvia hispanica* L.) from five northwestern locations in Argentina. *J Am Oil Chem Soc* 72, 1079–1081. <https://doi.org/10.1007/BF02660727>.
- Ayerza, R. y Coates, W. 2006. Chía redescubriendo un olvidado alimento de los aztecas. Del Nuevo Extremo. Buenos Aires, Argentina. (232 páginas).
- Ayerza, R. H. y Coates, W. 2009. Some quality components of four chia (*Salvia hispanica* L.) genotypes grown under tropical coastal desert ecosystem conditions. *Asian Journal of Plant Sciences*, 8(4), 301.
- Ayerza, R. (h), Coates, W., 2011. Protein content, oil content and fatty acid profiles as potential criteria to determine the origin of commercially grown chia (*Salvia hispanica* L.). *Ind. Crop. Prod.* 34, 1366–1371. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.007>.

- Baginsky, C., Arenas, J., Escobar, H., Garrido, M., Valero, N., Tello, D., Pizarro, L., Valenzuela, A., Morales, L. y Silva, H., 2016. Growth and yield of chia (*Salvia hispanica* L.) in the Mediterranean and desert climates of Chile. *Chil. J. Agr. Res.*, 76, 255–264.
- Benetoli Da Silva, T. R. B., de Melo, et al., (2020). Response of chia (*Salvia hispanica* L.) to sowing times and phosphorus rates over two crop cycles. *Heliyon*, 6(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05051>.
- Bochicchio, R., Rossi, R., Labella, R., Bitella, G., Perniola, M., y Amato, M., 2015. Effect of sowing density and nitrogen top-dress fertilization on growth and yield of chia (*Salvia hispanica* L.) in a Mediterranean environment. First results. *Italian Journal of Agronomy*, 10(3), 163-166.
- Cabrera-Santos, D., Ordóñez-Salanueva, C.A., Sampayo-Maldonado, S., Campos, J., Orozco-Segovia, A., Flores-Ortiz, C.M., 2021. Chia (*Salvia hispanica* L.) seed soaking germination, and fatty acid behavior at different temperatures. *Agriculture* 11, 498. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060498>.
- Cahill, J. P., 2004. Genetic diversity among varieties of chia (*Salvia hispanica* L.). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 51(7), 773-781.
- Câmara, A. K., Vidal, V. A., Santos, M., Bernardinelli, O. D., Sabadini, E. y Pollonio, M. A., 2020. Reducing phosphate in emulsified meat products by adding chia (*Salvia hispanica* L.) mucilage in powder or gel format: A clean label technological strategy. *Meat Science*, 163, 108085.
- Caffaro, S. V. y Nakayama, F., 1988. Vegetative activity of the main stem terminal bud under photoperiod and flower removal treatments in soybean. *Functional Plant Biology*, 15(3), 475-480.
- Chourard P., 1960. Vernalization and its relations to dormancy. *Annual Review of Plant Physiology* 11, 191-238.
- Cirilo, A. G. y Andrade, F. H., 1996. Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Sci.*, 36(2), 325-331.
- Coates, W. y Ayerza, R., 1998. Commercial production of chía in Northwestern Argentina. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 75(10), 1417-1420.
- Connor, D. J., Theiveyanathan, S. y Rimmington, G. M., 1992. Development, growth, water-use and yield of a spring and a winter wheat in response to time of sowing. *Australian Journal of Agricultural Research*, 43(3), 493-516.

- Craufurd, P. Q. y Cartwright, P. M., 1989. Effect of photoperiod and chlormequat on apical development and growth in a spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivar. *Annals of Botany*, 63(5), 515-525.
- De Freitas, T. F., Rissato, B. B., Müller, A. L., Brustolin, D. B., Coltro-Roncato, S., Dildey, O. D., y Mendonca-Müller, H. F., 2016. Development and production of chia (*Salvia hispanica* L.) in different space arrangements. *African Journal of Agricultural Research*, 11(43), 4384-4388.
- Deng, X. y Scarth, R. 1998. Temperature effects on fatty acid composition during development of low-linolenic oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 75(7), 759-766.
- Diez, J., Anuch Tiranti, J. V., Sadras, V. O., Acreche, M. M. 2021. The critical period for grain yield in chia (*Salvia hispanica* L.). *Crop & Pasture Science*, 72, 213-222.
- Egli, D. B., 1998. Seed biology and the yield of grain crops. CAB International. UK, 178 pp.
- Ellis, R. H., Asumadu, H., Qi, A. y Summerfield, R. J., 2000. Effects of photoperiod and maturity genes on plant growth, partitioning, radiation use efficiency, and yield in soyabean (*Glycine max* L. [Merr.]) "Clark". *Annals of Botany*, 85(3), 335-343.
- Escobar, H., Solís Ovando, L. D., Contreras, D., Baginsky, C., Arenas, J. y Silva, H., 2018. Effect of irrigation water availability on gas exchange, sees yield, biomass and water use efficiency in two chia phenotypes established in Azapa valley, Arica, Chile. *Interciencia*, 43(1), 55-61.
- Evans, L. T., 1987. Short day induction of inflorescence initiation in some winter wheat varieties. *functional plant biology. Australian Journal of Plant Physiology*, 14(3), 277-286
- Faegri, K.; Van Der Pijl, L., 1979. *The Principles of Pollination Ecology*. Tercera edición revisada. Pergamon press. London. 244 p. I.S.B.N. 008021338.
- Fernald, M. L., 1900. A synopsis of the Mexican and Central American species of *Salvia*. *Proc. Amer. Acad.* 35, 489-573.
- Fischer, R. A., 1984. Wheat in tropical environments. II. Crop Growth and grain yield. *Field Crops Research*, 8, 207-227.
- Fischer, R. A., 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agric. Sci., Camb*, 105, 447-461

- Flood, R. G. y Halloran, G. M., 1984a. Basic development rate in spring wheat. *Agronomy Journal* 76, 260-264.
- Frank, A. B., Bauer, A. y Black, A. L., 1987. Effects of air temperature and water stress on apex development in spring wheat. *Crop Science* 27, 113-116.
- Frank, A. B., Bauer, A. y Black, A. L., 1988. Effects of air temperature on head development in spring wheat. *North Dakota Farm Research*, 45, 16-18.
- Gallagher, J. N., 1979. Field studies of cereal leaf growth. I. Initiation and expansion in relation to temperature and ontogeny. *Journal of Experimental Botany*, 30, 625-636.
- Goergen, P. C., Nunes, U. R., Stefanello, R., Lago, I., Nunes, A. R. y Durigon, A., 2018. Yield and Physical and Physiological Quality of *Salvia hispanica* L. Seeds Grown at Different Sowing Dates. *J. Agric. Sci*, 10, 182.
- González, F. G., Slafer, G. A. y Miralles, D. J., 2003. Grain and floret number in response to photoperiod during stem elongation in fully and slightly vernalized wheats. *Field Crops Research*, 81(1), 17-27.
- Gonzalez, F. G., Slafer, G. A., Miralles, D. J., 2005a. Floret development and survival in wheat plants exposed to contrasting photoperiod and radiation environments during stem elongation. *Functional Plant Biology* 32, 189–197.
- Grimes, S., Phillips, T., Claupein, W. y Graeff-Hönninger, S., 2018. Chia: Is a new tetraploid chia (*Salvia hispanica* L.) genotype able to revolutionize European agriculture. *The Food System Approach: New Challenges for Education, Research and Industry*; ISEKI Food Association: Stuttgart, Germany, 79.
- Grimm, S. S., Jones, J. W., Boote, K. J. y Herzog, D. C., 1994. Modelling the occurrence of reproductive stages after flowering for four soybean cultivars. *Agronomy Journal*, 86(1), 31-38.
- Hadley, P., Roberts, E. H., Summerfield, R. J. y Minchin, F. R., 1984. Effects of temperature and photoperiod on flowering in soya bean (*Glycine max* L. [Merr.]): a quantitative model. *Annals of Botany*, 53(5), 669-681.
- Haque, M. S., 1981. Karyotypes and chromosome morphology in the genus *Salvia* Linn. *Cytologia*, 45(4), 627-640.
- Halloran, G. M. y Boydell, C. W., 1967. Wheat chromosomes with genes for vernalization response. *Canadian Journal of Genetics and Cytology* 9, 632-639.

- Halloran, G. M., 1976. Genetic control of photoperiodic sensitivity and maturity in spring wheat within narrow limits of adaptation. *Euphytica* 25, 489-498.
- Halloran G. M. y Pennell, A. L., 1982. Duration and rate of development phases in wheat in two Environments. *Annals of Botany*, 49, 115-121.
- Harwood, J. L. 1994. Environmental factors which can alter lipid metabolism. *Progress in lipid research*, 33(1-2), 193-202.
- Hay, R. K., y Kirby, E. J. M., 1989. Convergence and synchrony-a review of the coordination of development in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 42(5), 661-700.
- Ixtaina, V. Y., 2010. Caracterización de la semilla y el aceite de chía (*Salvia hispanica* L.) obtenido mediante distintos procesos: aplicación en tecnología de alimentos (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de la Plata).
- Izquierdo, N. G., Aguirrezábal, L. A. N., Andrade, F. H. y Pereyra, V. 2002. Night temperature affects fatty acid composition in sunflower oil depending on the hybrid and the phenological stage. *Field Crops Research*, 77(2-3), 115-126.
- Izquierdo, N. G., Aguirrezábal, L. A. N., Andrade, F. H. y Cantarero, M. G. 2006. Modeling the response of fatty acid composition to temperature in a traditional sunflower hybrid. *Agronomy Journal*, 98(3), 451-461.
- Izquierdo, N.G. y Aguirrezábal, L.A.N. 2008. Genetic variability in the response of fatty acid composition to minimum night temperature during grain filling in sunflower. *Field Crops Res.* 106, 116-125.
- Izquierdo, N. G., Dosio G. A. A., Cantarero, M., Lujan, J., Aguirrezábal, L.A.N., 2008. Weight per grain, oil concentration, and solar radiation intercepted during grain filling in black hull and striped hull sunflower hybrids. *Crop. Sci.* 48, 688-699.
- Izquierdo, N. G., Aguirrezábal, L. A. N., Andrade, F. H., Geroudet, C., Valentinuz, O., Iraola, M. P. 2009. Intercepted solar radiation affects oil fatty acid composition in crop species. *Field Crops Research*, 114(1), 66-74.
- Izquierdo, N.G., Benech-Arnold, R., Batlla, D., González Belo, R., Tognetti, J., 2017. Seed composition in oilcrops: its impact on seed germination performance. In: Ahmad, P. (Ed.), *Oil Seed Crops: Yield and Adaptations under Environmental Stress*, first ed. Wiley, Toronto, ON, Canada, pp. 34–51.

- Jamboonsri, W., Phillips, T. D., Geneve, R. L., Cahill, J. P. y Hildebrand, D. F., 2012. Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica* L. - a new ω 3 source. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 59(2), 171-178.
- Johnson, I. R. y Thornley, J. H., 1985. Temperature dependence of plant and crop processes. *Annals of Botany*, 55, 1-24.
- Kane, M. V., Steele, C. C., Grabau, L. J., MacKown, C. T. y Hildebrand, D. F. 1997. Early-maturing soybean cropping system: III. Protein and oil contents and oil composition. *Agronomy Journal*, 89(3), 464-469.
- Kantolic, A. G. y Slafer, G. A., 2001. Photoperiod sensitivity after flowering and seed number determination in indeterminate soybean cultivars. *Field Crops Research*, 72(2), 109-118.
- Kantolic, A. G., Mercau, J. L., Slafer, G. A. y Sadras, V. O., 2007. Simulated yield advantages of extending post-flowering development at the expense of a shorter pre-flowering development in soybean. *Field Crops Research*, 101(3), 321-330.
- Kantolic A., 2008. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: impacto sobre el rendimiento y la adaptación de genotipos. *Rev. Facultad de Agronomía UBA*, (28)1, 63-88.
- Kantolic A., De la Fuente, E., Ploschuk, E., 2008. Generación del rendimiento y su calidad en los cultivos industriales. Capítulo 1.2. En: Facultad de Agronomía. Cultivos Industriales, pp. 47.
- Katan, M. B., Zock, P. L. y Mensink, R. P., 1994. Effects of fats and fatty acids on blood lipids in humans: an overview. *The American journal of clinical nutrition*, 60(6), 1017-1022.
- Ketring, D. L. y Wheless, T. G., 1989. Thermal time requirements for phenological development of peanut. *Agronomy Journal*, 81, 910-917.
- Kiniry, J. R., Ritchie, J. T., Musser, R. L., Flint, E. P. y Iwig, W. C., 1983. The Photoperiod Sensitive Interval in Maize 1. *Agronomy Journal*, 75(4), 687-690.
- Landsberg, J. J., 1977 Effects of weather on plant development. *Environmental Effects on Crop Physiology*. Landsberg, J. J. y CV. Cuț, C. V. ng (Editores). Academic Press, London, 289-307.
- Major, D. J., 1980. Photoperiod response characteristics controlling flowering of nine crop species. *Canadian Journal of Plant Science*, 60(3), 777-784.

- Major D. J. y Kiniry J. R., 1991. Predicting daylength effects on phenological processes. Capítulo 4. Predicting Crop Phenology. Pp: 28.
- Martínez, M. 1959. Plantas Útiles de la Flora Mexicana. Ediciones de Botas. México. pp. 198-202.
- Mann, P. 1959. Systematics of flowering plants. Methuen and Co. Ltd. London. pp. 254-255.
- Masle, J., Doussinault, G., Farquhar, G. D. y Sun, B., 1989. Foliar stage in wheat correlates better to photo thermal time than to thermal time. *Plant, Cell & Environment*, 12(3), 235-247.
- Menga, V., Amato, M., Phillips, T. D., Angelino, D., Morreale, F., y Fares, C., 2017. Gluten-free pasta incorporating chia (*Salvia hispanica* L.) as thickening agent: An approach to naturally improve the nutritional profile and the in vitro carbohydrate digestibility. *Food Chemistry*, 221, 1954-1961.
- Midmore, D. J., Cartright, P. M. y Fischer, R. A., 1982. Wheat in tropical environments. I. Phasic development and spike size. *Field Crops Research* 5, 185-200.
- Minami, M., Kimura, S., Endo, T., Hamaue, N., Hirafuji, M., Togashi, H. y Kobayashi, T., 1997. Dietary docosahexaenoic acid increases cerebral acetylcholine levels and improves passive avoidance performance in stroke-prone spontaneously hypertensive rats. *Pharmacology biochemistry and behavior*, 58(4), 1123-1129.
- Miralles D. J., Katz, S. D., Colloca, A., Slafer, G. A., 1998 Floret development in near isogenic wheat lines differing in plant height. *Field Crops Research*, 59, 21–30.
- Miralles D. J., Slafer G. A., 1999. Wheat development En: E. H. Satorre y G. A. Slafer (Editores.), *Wheat Ecology and Physiology of yield determination*. Pp: 13-43.
- Miralles, D. J., Ferro, B. C. y Slafer, G. A., 2001. Developmental responses to sowing date in wheat, barley and rapeseed. *Field Crops Research*, 71(3), 211-223.
- Mohd, A., Yeap, N., Ho, S. K., Beh, W. Y., Tan, B. K., Tan, S. G., 2012. The promising future of chia, (*Salvia hispanica* L.). *BioMed Research International*.
- Montieth, J. L., 1977. Climatic variation and the growth of crops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107, 749-774.
- Morandi, E. N., Casano, L. M. y Reggiardo, L. M., 1990. Post-flowering photoperiodic effect on reproductive efficiency and seed growth in soybean. *Field Crops Research*, 18(4), 227-241.

- Morrison, M. J., McVetty, P. B. y Shaykewich, C. F., 1989. The determination and verification of a baseline temperature for the growth of Westar summer rape. *Canadian Journal of Plant Science*, 69, 455-464.
- Ong, C. K., 1983. Response to temperature in a stand of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.). I. Vegetative development. *Journal of Experimental Botany* 34(140), 322-326.
- Orona-Tamayo, D., Valverde, M. E. y Paredes-López, O., 2017. Chia: The new golden seed for the 21st century: Nutraceutical properties and technological uses. In *Sustainable protein sources* 265-281. Academic Press.
- Palma-Rojas, C., Gonzalez, C., Carrasco, B., Silva, H., y Silva-Robledo, H., 2017. Genetic, cytological and molecular characterization of chia (*Salvia hispanica* L.) provenances. *Biochemical Systematics and Ecology*, 73, 16-21.
- Peperkamp, M., 2015. CBI Tailored Intelligence: chia from Bolivia a modern super seed in a classic pork cycle. CBI Ministry of Foreign Affairs. The Hague, Netherlands.
- Piratesh, B. y Welsh, J. R., 1980. Effect of temperature on the heading date of wheat cultivars under a lengthening photoperiod. *Crop Science* 20, 453-456.
- Ploschuck, E. L. y Hall, A. J., 1995. Capitulum position in sunflower affects grain temperature and duration of grain filling. *Field Crops Res.* 44: 111-117.
- Pool, A., y Knapp, S., 2007. Lamiaceae. *Manual de Plantas de Costa Rica*. Hammel, B. E., Grayum, M. H., Herrera, C. y Zamora, N. (eds.), 6,49-89.
- Porter, J. R. y Delecolle, R., 1988. Interaction of temperature with other environmental factors in controlling the development of plants. In *Plants and Temperature*. Long, S. P. y Woodward, F. I. (Editores). *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 42, 133-156.
- Ramamoorthy, T., 1985. Flora fanerogámica descriptiva: *Salvia* L. 2, 632-644. En: Calderón, G. y Rzedowski, J., 2010. *Flora fanerogámica del valle de México*. Michoacán: Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 1406p.
- Ramamoorthy, T., 1993. Revisión taxonómica de *Salvia* sección sigmoideae. *Acta Botánica Mexica* (1993), 23: 65-102.
- Ramamoorthy, V., Viswanathan, R., Raguchander, T., Prakasam, V., y Samiyappan, R., 2001. Induction of systemic resistance by plant growth promoting rhizobacteria in crop plants against pests and diseases. *Crop protection*, 20(1), 1-11.

- Raper C. D. Jr. y Kramer P. J., 1987. Stress physiology. Wilcox, J. R. (Editor) Soybeans: Improvement, production and uses. 2da ed. Agronomic Monograph no. 16, pp 589-634 ASA, CSSA y SSSA. Madison. WI.
- Rawson, H. M., 1987. Constraints associated with rice-wheat rotations: Effects of high temperatures on the development and yield of wheat and practices to reduce deleterious effects. <https://www.researchgate.net/publication/266023312>.
- Rawson, H. M., 1970. Spikelet number, its control and relation to yield per ear in wheat. Australian Journal of Biological Sciences, 23(1), 1-16.
- Rawson, H. M., 1971. An upper limit for spikelet number per ear in wheat as controlled by photoperiod. Australian Journal of Agricultural Research, 22(4), 537-546.
- Rawson, H. M. y Bagga, A. K., 1979. Influence of temperature between floral initiation and flag leaf emergence on grain number in wheat. Functional Plant Biology, 6(3), 391-400.
- Rawson, H. M., 1992. Plant responses to temperature under conditions of elevated CO₂. Australian Journal of Botany 40, 473-490.
- Rawson, H. M., 1993. Radiation effects on development rate in a spring wheat grown under different photoperiods and high and low temperatures. Australian Journal of Plant Physiology 20, 719-727.
- Rebetzke, G. J., Pantalone, V. R., Burton, J. W., Carver, B. F. y Wilson, R. F. 1996. Phenotypic variation for saturated fatty acid content in soybean. Euphytica, 91(3), 289-295.
- Roberts E. H., Hadley, P. y Summerfield R. J., 1987. Measurement and prediction of flowering in crops annual crops. Manipulation of flowering. J. G. Atherton (Editor), 15- 50. Butterworths, Londres.
- Rodrigues dos Reis Gallo, L., et al., 2020. Gel de chía (*Salvia hispánica* L.) como sustituto de huevo de tortas de chocolate: aplicabilidad y cualidades microbianas y sensoriales después de almacenamiento. Journal of Culinary Science & Technology, 18:1, 29-39. Doi: 10.1080/15428052.2018.1502111.
- Satorre, E. H., Benech, R. L., Slafer, G. A., De la Fuente, E. B., Miralles, D. J., Otegui, M. E. y Savin, R., 2003. Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina. 800 páginas. I.S.B.N.: 950-29-0713-2. 800.
- Scalise, J., 2014 Caracterización y diagnóstico de la cadena de valor de la chía en Argentina. Unidad para el Cambio Rural, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la

- Nación Argentina, Buenos Aires. Available at: <https://www.argentina.gob.ar/agricultura/agricultura-ganaderia-y-pesca>.
- Schulte, L.R., Ballard, T., Samarakoon, T., Yao, L., Vadlani, P., Staggenbor, S., Rezac, M., 2013. Increased growing temperature reduces content of polyunsaturated fatty acids in four oilseed crops. *Ind. Crop. Prod.* 51, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.08.075>.
- Silva, H., Arriagada, C., Campos-Saez, S., Baginsky, C., Castellaro-Galdames, G., y Morales-Salinas, L., 2018. Effect of sowing date and water availability on growth of plants of chia (*Salvia hispanica* L) established in Chile. *PloS one*, 13(9), e0203116.
- Squire, G. R., 1989a. Response to temperature in a stand of pearl millet. 9. Expansion processes. *Journal of Experimental Botany*, 40, 1383-1389.
- Stevens, W. D., Ulloa, C., Pool, A. y Montiel, O. M., 2001. *Flora de Nicaragua*, 85(1), 943. St. Louis: Missouri Botanical Garden Press.
- Slafer, G. A. y Savin, R., 1991. Developmental base temperature in different phenological phases of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Experimental Botany*, 42, 1077-1082.
- Slafer, G. A. y Rawson, H. M., 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. *Functional Plant Biology*, 21(4), 393-426.
- Slafer, G. A. y Rawson, H. M., 1996. Responses to photoperiod change with phenophase and temperature during wheat development. *Field Crops Research*, 46(1-3), 1-13.
- Slafer, G. A., Abeledo, L. G., Miralles, D. J., Gonzalez, F. G. y Whitechurch, E. M., 2001. Photoperiod sensitivity during stem elongation as an avenue to raise potential yield in wheat. Bedö, Z. and Lang, L. (Editores). In: *Wheat in a global environment*, 487-496. Kluwer Academic Publishers.
- Slafer, G. A. 2003. Genetic basis of yield as viewed from a crop physiologist's perspective. *Annals of Applied Biology*, 142(2), 117-128.
- Summerfield, R. J., et al., 1991. Towards a reliable prediction of time to flowering in six annual crop. I. The development of simple models for fluctuating field environments. *Expl. Agric.*, 27, 11-31.

- Summerfield, R. J., et al., 1993. Towards the reliable prediction of time to flowering in six annual crops. II. Soyabean (*Glycine max* L [Merr.]). *Experimental Agriculture*, 29(3), 253-289.
- Thomas, J. F. y Kanchanapoom, M. L., 1991. Shoot meristem activity during floral transition in (*Glycine max* L. [Merr.]). *Botanical Gazette*, 152(2), 139-147.
- Thurling, N. y, Das, L. V., 1980. The relationship between pre-anthesis development and seed yield of spring rape (*Brassica napus* L.). *Australian Journal of Agricultural Research*, 31(1), 25-36.
- Urbizo-Reyes, U., San Martín-González, M. F., García-Bravo, J. y Liceaga, A. M., 2020. Development of chia seed (*Salvia hispanica* L.) mucilage films plasticized with polyol mixtures: Mechanical and barrier properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 854-864.
- Walker, J. B. y Sytsma, K. J., 2007. Staminal evolution in the genus *Salvia* (Lamiaceae): molecular phylogenetic evidence for multiple origins of the staminal lever. *Annals of Botany*, 100(2), 375-391.
- Whitechurch, E. M., Slafer, G. A. y Miralles, D. J., 2007. Variability in the duration of stem elongation in wheat and barley genotypes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 193(2), 138-145.
- Williams, J.R., Salon, C., Layzell, D.B., 1999. Evidence for light-stimulated fatty acid synthesis in soybean fruit. *Plant Physiol.* 120 (4), 1117–1128. <https://doi.org/10.1104/pp.120.4.1117>.
- Win, A. N., et al., 2018. Chia (*Salvia hispanica* L.) experiment at a 30° N site in Sichuan Basin, China. *Ciência Rural*, 48(9). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180105>.
- Wood, J. R. I., y Harley, R. M., 1989. The genus *Salvia* (Labiatae) in Colombia. *Kew Bulletin*, 211-278.

Capítulo 2

Escala fenológica estandarizada para la chía

(De este capítulo deriva la publicación: Phenological growth stages in chia (*Salvia hispanica* L.) according to the BBCH scale. Pérez Brandán et al., 2019. Scientia Horticulturae 255: 292-297. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.043>).

2.1 Introducción

La fenología es una rama de la ciencia que estudia los fenómenos biológicos que se presentan periódicamente, acomodados a ritmos estacionales, y que tienen relación con el clima y con el curso anual del tiempo atmosférico en un determinado lugar (Victoria et al., 2010). En este sentido, la fenología estudia los cambios visibles de los procesos vitales básicos que se producen durante el ciclo de vida de las plantas, tanto en la morfología externa como en la actividad del ápice meristemático.

La descripción de los diferentes estados ontogénicos externos e internos por los que atraviesa una planta, puede ser realizada mediante el uso de diferentes escalas que tienen en cuenta los cambios en el crecimiento y desarrollo a lo largo del ciclo de la misma. Muchas veces, los eventos morfológicos externos se han podido asociar con cambios morfológicos y/o funcionales en los ápices en fases anteriores (Zadoks et al., 1974).

La Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt and Chemical Industry (BBCH) propuso un sistema de escala para definir los eventos fenológicos de las plantas de importancia agrícola (Lancashire et al., 1991; Meier et al., 2009). Con este tipo de escalas se logró satisfacer la necesidad de conocimientos básicos estandarizados sobre la biología de las plantas y los puntos críticos del ciclo de vida de las mismas (Bleiholder et al., 1989, Hack et al., 1992).

Siguiendo el sistema propuesto por Zadoks et al. (1974), la escala BBCH consiste en una codificación decimal que divide el crecimiento de una planta en etapas principales o generales y etapas secundarias o específicas. Las etapas de crecimiento (ya sean principales o secundarias) se codifican por medio de números del 0 al 9. Este tipo de escalas están destinadas a ser fácilmente reconocidas y utilizadas a campo, incluso para un observador con poca capacitación técnica (Zadoks et al., 1974).

Numerosas especies cultivadas cuentan con una escala fenológica estandarizada según BBCH. Dentro de los principales cultivos a nivel mundial se disponen de escalas fenológicas para el trigo (Zadoks et al., 1976), el maíz (Weber y Bleiholder, 1990), el arroz (Lancashire et al., 1991), la soja (Munger et al., 1997) y la colza (Weber y Bleiholder, 1990). Otras plantas de interés agrícola como el girasol (Weber y Bleiholder, 1990), el haba (Weber y Bleiholder,

1990), la remolacha (Meier et al., 1993), la papa (Hack et al., 1993), los frutales de pepita (Meier et al., 1994), los frutales de carozo (Meier et al., 1994), las grosellas (Meier et al., 1994), la frutilla (Meier et al., 1994), los cítricos (Agusti et al., 1995), el olivo (Sanz-Cortes et al., 2002), el café (Arcila-Pulgarín et al., 2002), el banano (Gonzales et al., 2002), la vid (Lorenz et al., 1994), el algodón (Munger et al., 1998), el maní (Munger et al., 1998a), el lúpulo (Rossbauer et al., 1995), los vegetales de bulbo (Feller et al., 1995a), los vegetales de tallo y raíz (Feller et al., 1995a), las cucurbitáceas (Feller et al., 1995b), la arveja (Weber y Bleiholder, 1990), las solanáceas (Feller et al., 1995b) y la quínoa (Sosa et al., 2017) también disponen de sus respectivas escalas fenológicas estandarizadas. Inclusive, existen escalas fenológicas desarrolladas para malezas como *Agropyron repens* L., *Cynodon dactylon* L., *Cyperus rotundus* L., *Galium aparine* L., *Polygonum convolvulus* L., *Ranunculus repens* L. (Hess et al., 1997).

La fenología de la chía solo se ha descrito someramente por la duración global de las fases en términos de grados día (Baginsky et al., 2016), pero sin considerar una escala fenológica estandarizada que tenga en cuenta los cambios morfológicos. Disponer de una escala fenológica estandarizada para este cultivo permitirá diseñar prácticas de manejo que lleven a maximizar el rendimiento (Bochicchio et al., 2015; Ayerza y Coates, 2009).

Las escalas fenológicas estandarizadas son herramientas de amplia utilidad para productores, investigadores y mejoradores genéticos. Sin embargo, todavía no existe un sistema estandarizado, preciso y fácil para utilizar que describa los eventos fenológicos de la chía. Además, en el caso particular de esta tesis, permite estandarizar los procesos de crecimiento y desarrollo que se describirán en los siguientes capítulos de la misma.

El objetivo es desarrollar y describir las etapas fenológicas de la planta de chía de una manera simple, pero precisa, de acuerdo al método propuesto por BBCH.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Condiciones generales del ensayo

El área de estudio se ubicó en Cerrillos, provincia de Salta, en la Estación Experimental Agropecuaria del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (24° 53' 32" S, 65° 28' 26" O, 1420 m s.n.m.). El suelo está clasificado como Ustochrept Udic (USDA Soil Taxonomy) con 2,6% de materia orgánica (Walkley Black, 1934). El clima en este sitio es subtropical con una precipitación media anual de 695 mm (Bianchi et al., 2005). La temperatura media histórica en enero (verano) y julio (invierno) es de 21,2 °C y 10,3 °C, respectivamente (Bianchi et al., 1996).

2.2.2 Material genético

Dado que en Argentina este cultivo carece de variedades comerciales certificadas, para este capítulo de la tesis el ensayo se condujo a partir de semillas de una población estabilizada de chíá obtenida de los campos de cultivo de productores. Dicha población, de amplia difusión comercial, tiene plantas con flores púrpuras y granos con colores blanco, beige y marrón grisáceo. Esta población es una de las dos utilizadas a lo largo de esta tesis para describir aspectos de desarrollo, crecimiento y partición.

2.2.3 Diseño experimental y tratamientos

Del amplio espectro de combinaciones de tratamientos a campo utilizados en esta tesis (para más detalle ver Cap. 3), y en base a resultados preliminares del efecto de la fecha de siembra sobre el crecimiento y desarrollo de este cultivo, para desarrollar la escala BBCH de la chíá la siembra se realizó a mediados de febrero en parcelas de 6 surcos de 6 m de largo espaciados entre ellos a 0,52 m. La siembra se realizó de manera manual con elevadas densidades de plantas, y poco después de la emergencia de las plántulas se ralearon las parcelas hasta lograr una densidad final de 20 plantas m⁻², considerada una densidad óptima para los ambientes donde se realizó esta tesis. Dado que este ensayo fue un ensayo no manipulativo, las observaciones se realizaron por triplicado en parcelas diferentes.

Para complementar la lluvia natural y evitar el déficit de agua, las parcelas se regaron por goteo durante todo el ciclo del cultivo. Se aplicaron fungicidas e insecticidas para prevenir enfermedades y daños por insectos. Asimismo, las malezas fueron removidas manualmente durante todo el ciclo del cultivo. Dada la alta fertilidad del suelo de la zona de ensayo, y copiando las prácticas tradicionales de los productores para este cultivo, las plantas no fueron fertilizadas.

2.2.4 Mediciones realizadas

En la emergencia del cultivo, se etiquetaron cinco plantas uniformes y representativas de tres parcelas. Las mismas se monitorearon dos veces por semana durante todo el ciclo del cultivo. En cada planta marcada, se registraron y documentaron fotográficamente las etapas fenológicas del cultivo de acuerdo con el sistema BBCH.

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Etapas de crecimiento principales

Dada las características morfológicas de la chíá, solo se pudieron registrar ocho de las diez etapas de crecimiento principales comúnmente detalladas por la BBCH (Tabla 1). La etapa principal 0 fue denominada como *Germinación* y abarcó el período desde la semilla seca hasta la aparición de cotiledones. La etapa principal 1 fue denominada como *Aparición de las hojas* y abarcó el período desde aparición y despliegue de los cotiledones hasta el momento en que el número final de hojas quedó determinado. La etapa principal 2 fue denominada como *Aparición de ramificaciones* y abarcó el periodo completo de aparición de brotes laterales (ramas) a lo largo del ciclo de cultivo. La etapa principal 5 fue denominada como *Crecimiento de la inflorescencia* y hace referencia al verticilastro desarrollado sobre el eje del tallo principal y abarca el período desde que ese verticilastro es detectable a simple vista hasta el comienzo de la floración. La etapa principal 6 fue denominada como *Floración* y abarcó el período de aparición de flores individuales a lo largo del verticilastro principal. La etapa principal 7 fue denominada como *Cambios en el fruto* y abarca el periodo de llenado de grano en el que los frutos experimentan cambios en la textura de su masa desde lechoso a pastoso. La etapa principal 8 fue denominada como *Maduración* y abarca el período de llenado del grano caracterizado por cambios asociados al color del pericarpio. La etapa principal 9 fue denominada como *Senescencia* y caracteriza el período de senescencia de las hojas. Se omitieron las etapas de *Elongación del tallo* (etapa principal 3) y de *Crecimiento de órganos vegetativos cosechables* (etapa principal 4). La primera es muy común en la familia Poaceae (Lancashire et al., 1991) y la segunda es muy común en cultivos como la papa o la frutilla (Meier et al., 2009). Por el contrario, en la chíá, como en otros cultivos de granos, solo se cosechan los granos y no la materia verde u otros órganos vegetativos. Se observaron resultados similares en cultivos como *Brassica napus*, *Vicia faba*, *Helianthus annuus* (Lancashire et al., 1991), *Glycine max* (Munger et al., 2008a), *Gossypium hirsutum* y *Arachis hypogaea* (Munger et al., 2008b), descritos siguiendo el sistema BBHC. Es importante señalar que, en esta escala, las etapas principales 1 y 2 describen fases vegetativas, mientras que desde la etapa principal 5 hasta la etapa principal 8 describe la fenología de las estructuras reproductivas del tallo principal.

Tabla 2.1. Descripción de los estadios fenológicos de chíá (*Salvia hispanica* L.) de acuerdo con la escala BBCH.

Etapas de crecimiento principales	Descripción	BBCH Código
0: Germinación	Semilla seca	00
	Inicio de imbibición de la semilla	01
	Imbibición de la semilla completada	03
	Radícula emergida de la semilla	05
	Radícula enlongada	06
	Hipocótilo con cotiledones emergidos de la semilla	07
	Hipocótilo con cotiledones creciendo hacia la superficie del suelo	08
	Emergencia: cotiledones emergidos de la superficie del suelo	09
	1: Aparición de las hojas	Cotiledones completamente expandidos
Primer par (dos hojas) expandido		11
Segundo par (cuatro hojas) expandido		12
Tercer par (seis hojas) expandido		13
Estados continúan hasta...		1n
Noveno par (dieciocho hojas) expandido o más		19
2: Aparición de ramificaciones	Ninguna ramificación lateral	20
	Dos ramificaciones laterales detectables	21
	Cuatro ramificaciones laterales detectables	22
	Seis ramificaciones laterales detectables	23
	Estados continúan hasta...	2n
	Fin de la aparición de ramificaciones laterales: 18 o más ramificaciones laterales detectables	29
5: Crecimiento de la inflorescencia (verticilastro del eje principal)	Inicio de la emergencia del verticilastro: verticilastro detectable en la punta del tallo principal	50
	Verticilastro diferenciado de las hojas juveniles (por lo general mayor a un centímetro), brácteas distinguibles de las hojas	51
	Verticilastro separado de las hojas más juveniles (aproximadamente 50% de su tamaño final)	55
	Verticilastro claramente separado de las hojas juveniles (tamaño total final)	57
	Flores visibles entre las brácteas	59

Tabla 2.1 (Continuación). Descripción de los estadios fenológicos de chíá (*Salvia hispanica* L.) de acuerdo con la escala BBCH.

Etapas der crecimiento Principales	Descripción	BBCH Código
6: Floración (verticilastro del eje principal)	Comienzo de floración: al menos una flor abierta en el tercio basal del verticilastro	60
	Plena floración: al menos una flor abierta en el tercio apical del verticilastro	65
	Declinación de la floración: ninguna flor en el tercio basal del verticilastro	67
	Fin de floración: ninguna flor visible en el verticilastro	69
	7: Cambios en el fruto (verticilastro del eje principal)	Granos en el tercio basal del verticilastro con textura lechosa
	Granos en el tercio basal del verticilastro con textura pasta blanda	73
	Granos en el tercio basal del verticilastro con textura pasta dura	75
	Granos en el tercio medio del verticilastro con textura pasta dura	77
	Granos en el tercio apical del verticilastro con textura pasta dura	79
8: Madurez	Pericarpio amarillo y transparente, fácilmente marcable con las uñas, conteniendo pasta beige	81
	Pericarpio amarillo opaco, no fácilmente marcable con las uñas	85
	Pericarpio blanco o negro, difícilmente marcable con las uñas, contenido seco. Madurez fisiológica	89
9: Senescencia	Comienzo de decoloración de las hojas	91
	Mayor parte de las hojas amarillas	93
	50% de las hojas marrones	95
	Hojas muertas y caídas	97
	Producto cosechable (granos)	99

2.3.2 Etapas de crecimiento secundarias

2.3.2.1 Etapa de crecimiento principal 0. Germinación

Las etapas de crecimiento secundario importantes durante la germinación fueron la imbibición completa de la semilla (etapa 03), radícula emergida o elongada (etapa 05 o 06) (Figura 2.1, panel superior izquierdo) y emergencia de cotiledones (etapa 09) (Tabla 2.1). Esta etapa es relevante en el establecimiento del cultivo ya que cualquier adversidad ambiental (anegamiento o encostramiento del suelo) podría generar un estand de plantas bajo (Awadhwal y Thierstein, 1985; Setter y Waters, 2003). Por lo tanto, la labranza del suelo debe hacerse con extremo cuidado.

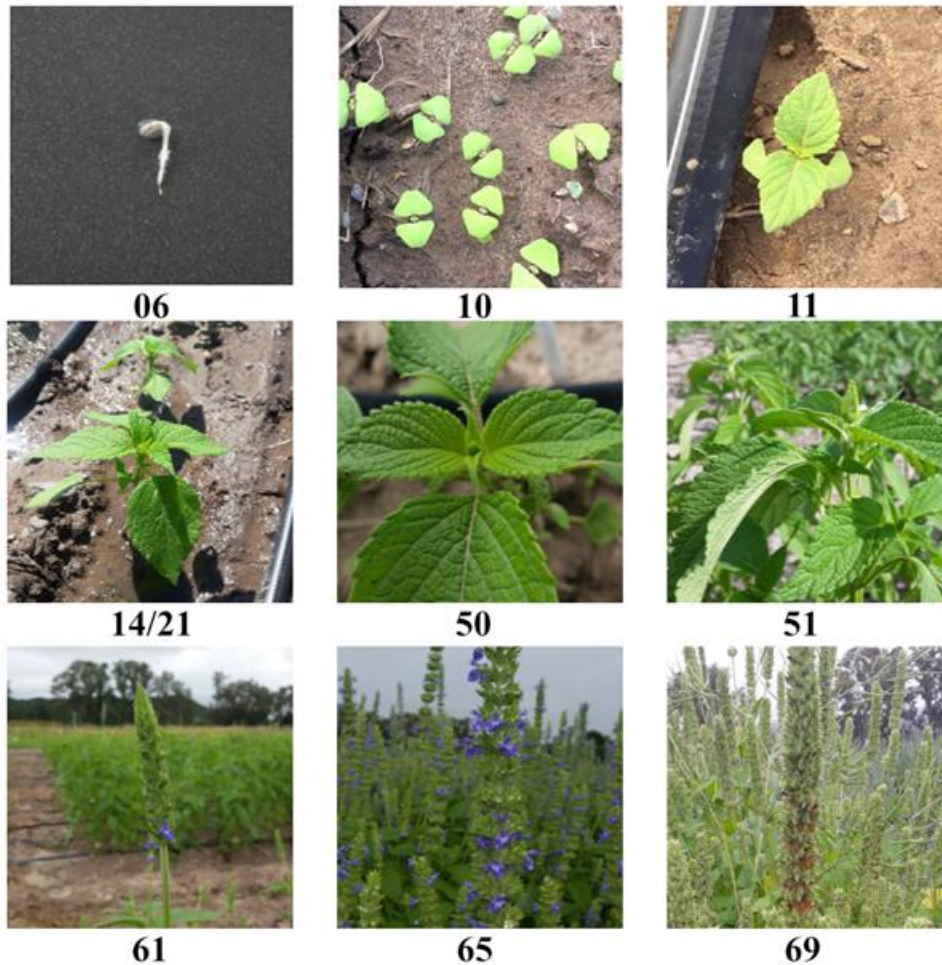


Figura 2.1. Etapas fenológicas de la chía (*Salvia hispanica* L.) según la escala BBCH. Por nomenclatura, cuando dos fases fenológicas coinciden en el tiempo, se utiliza una barra vertical entre ellas. 06 = radícula enlongada; 10 = cotiledones expandidos; 11 = primer par de hojas expandido; 14/21 = cuarto par de hojas expandidos y/o primer par de ramificaciones laterales; 50 = verticilastro detectable en la parte superior del tallo principal; 51 = verticilastro diferenciado de las hojas; 61 = comienzo de la floración; 65 = plena floración; 69 = fin de floración.

2.3.2.2 Etapa de crecimiento principal 1. Aparición de hojas

En chía, las hojas emergen de a pares y el número final de hojas depende del genotipo, el manejo y/o las condiciones ambientales. Esta etapa comienza con los cotiledones expandidos (etapa 10) (Figura 2.1, panel superior central y Figura 2.2), seguido por la expansión del primer par de hojas (etapa 11) (Figura 2.1, panel superior derecho) hasta la expansión del último par de hojas (etapa 1n o 19, dependiendo del número final "n" de hojas) (Figura 2.2 y Tabla 2.1). Una hoja se considera expandida cuando se visualiza correctamente su pedúnculo y se observa la aparición del siguiente par de hojas.

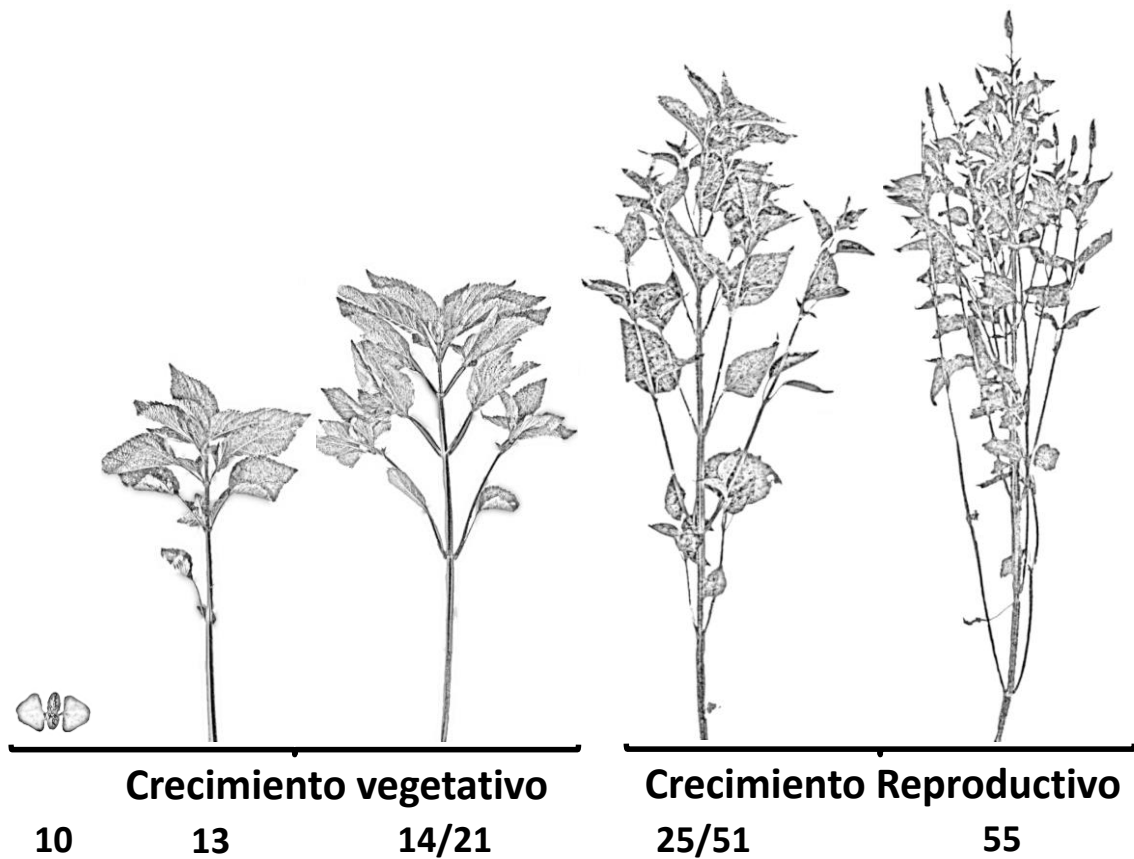


Figura 2.2. Diagrama que muestra la arquitectura de la planta de chíá (*Salvia hispanica* L.) en etapas vegetativas y reproductivas. Los números describen la escala BBCH. Se utiliza una barra lateral cuando dos fases coinciden en el tiempo. 10 = cotiledones expandidos; 13 = tercer par de hojas expandido; 14/21 = cuarto par de hojas expandidos y/o primer par de ramificaciones laterales; 25/51 = quinto par de ramificaciones laterales y/o verticilastro detectable en la parte superior del tallo principal; 51 = verticilastro diferenciado de las hojas; 55 = verticilastro separado de las hojas.

2.3.2.3 Etapa de crecimiento principal 2. Aparición de ramas

Esta etapa describe la formación de brotes laterales. Como ocurre con las hojas, las ramificaciones laterales aparecen de a pares (Tabla 2.1). La aparición de las ramificaciones laterales comienza con la etapa 21 (dos ramificaciones laterales detectables) (Figura 2.1, panel central izquierdo y Figura 2.2) hasta la formación del último par de ramificaciones laterales (etapa $2n$ o 29, dependiendo del número final "n" de ramificaciones (Tabla 2.1). La aparición de ramificaciones laterales coincide en el tiempo con algunas etapas secundarias de crecimiento de aparición de hojas y de aparición de inflorescencia. Por ejemplo, para las condiciones de sitio experimental de esta tesis, cuando el cuarto par de hojas apareció y se expandió, apareció simultáneamente el primer par de ramificaciones laterales (etapas 14/21) (Figura 2.1, panel central izquierdo y Figura 2.2).

La fecha y la densidad de siembra son prácticas de manejo que impactan en el buen desarrollo de las etapas de crecimiento 1 y 2 (por ejemplo, Silva et al., 2018). En otros cultivos, estas prácticas de manejo son altamente responsables de un cierre temprano del dosel vegetal que conduce a una alta captura de radiación fotosintéticamente activa (Purcell et al., 2002), un mayor aprovechamiento de agua disponible del suelo (evitando la evaporación desde la superficie del suelo) (van den Boogaard et al., 1996) y una mejor competencia con las malezas (Weiner et al., 2001).

2.3.2.4 Etapa de crecimiento principal 5. Crecimiento de la inflorescencia

Esta etapa comprende el crecimiento del verticilastro del eje principal (Tabla 2.1). Comienza cuando el verticilastro mide menos de 1 cm y está cubierto por hojas (etapa 50) (Figura 2.1, panel central medio), luego la etapa 51 diferencia el verticilastro de las hojas juveniles (Figura 2.1, panel central derecho y Figura 2.2). La etapa 55 representa el verticilastro diferenciado de la última hoja joven y con aproximadamente un 25% de su tamaño final (Figura 2.2). En la chía, el desarrollo de la inflorescencia coincide en el tiempo con el desarrollo de las ramificaciones laterales. Por ejemplo, para las condiciones experimentales de esta tesis, cuando se detectó el sexto par de ramificaciones laterales, el verticilastro fue detectable a simple vista (etapas 26/55) (Tabla 2.1 y Figura 2.2). Esta etapa finaliza cuando el verticilastro ha alcanzado su tamaño final (se ha desarrollado por completo) y las pequeñas flores son visibles entre las brácteas pero permanecen cerradas (etapa 59). Esta etapa, junto con la etapa de floración, son importantes porque durante ellas se produce el período crítico para la determinación del rendimiento (Anuch Tiranti et al., 2016; Diez et al., 2021).

2.3.2.5 Etapa de crecimiento principal 6. Floración

La etapa de floración describe la aparición de flores a lo largo del verticilastro del tallo principal (Tabla 2.1). El período de floración de la chía es extenso, por lo que coexisten en el mismo verticilastro flores en anthesis y granos que se están llenando. Como la floración de la chía es acrópeta (las flores se abren desde la base del verticilastro hacia el ápice del verticilastro), el período de floración se caracterizó dividiendo el verticilastro en tres partes, basal, media y apical. La floración comienza cuando se abre al menos una flor en el tercio basal del verticilastro (etapa 60) (Figura 2.1, panel inferior izquierdo). El estado de plena floración se produce cuando se abre al menos una flor en el tercio apical del verticilastro (etapa 65) (Figura 2.1, panel central inferior). La etapa 69 representa el final de la floración caracterizado por la ausencia de flores visibles a lo largo de todo el verticilastro. En esta última etapa, el verticilastro comienza a cambiar de color verde a marrón claro (Figura 2.1, panel inferior derecho).

2.3.2.6 Etapa de crecimiento principal 7. Cambios en el fruto

La etapa de crecimiento principal 7 describe los cambios del fruto en el verticilastro del tallo principal (Tabla 2.1). Comienza cuando los granos en el tercio basal del verticilastro tienen textura lechosa (etapa 71). Cuando los granos en el tercio basal tienen textura de masa blanda y los del tercio medio tienen textura lechosa, se alcanzaba la etapa 73. La etapa 75 está representada por granos en el tercio basal con textura de masa dura, granos en el tercio medio con textura de masa blanda y granos en el tercio apical con textura lechosa. Cuando los granos en el tercio medio tienen textura de masa dura y los del tercio apical tienen textura de masa suave, se alcanza la etapa 77. Esta etapa termina cuando los granos en el tercio apical tienen una textura de masa dura (etapa 79). Los cambios en los frutos y las etapas de floración se solapan en el tiempo (por ejemplo, etapas 65/71 o 69/75).

2.3.2.7 Etapa de crecimiento principal 8. Maduración

Durante la maduración, los granos disminuyen su contenido de agua, modifican la dureza y cambian el color del pericarpio. El pericarpio cambia de amarillo pálido a blanco o marrón grisáceo (según el genotipo) (Tabla 2.1 y Figura 2.3, paneles superiores). Esta etapa termina cuando los granos están secos y difíciles de marcar con los dedos (etapa 89).

2.3.2.8 Etapa de crecimiento principal 9. Senescencia

Esta etapa describe la senescencia de la planta por cambios en el color de las hojas y la caída de las mismas (Tabla 2.1). La senescencia comienza con la decoloración de las hojas basales (hojas amarillentas) (etapa 91), la cual continúa hacia el ápice. La etapa 95 se refiere al 50% de las hojas de la planta con coloración parda y cuando las hojas basales ya cayeron al suelo. Cuando todas las hojas cayeron, se alcanzó la etapa 97 (Figura 2.3, panel inferior izquierdo). Cuando termina esta etapa, toda la planta está seca y lista para la cosecha (etapa 99) (Figura 2.3, panel inferior derecho).

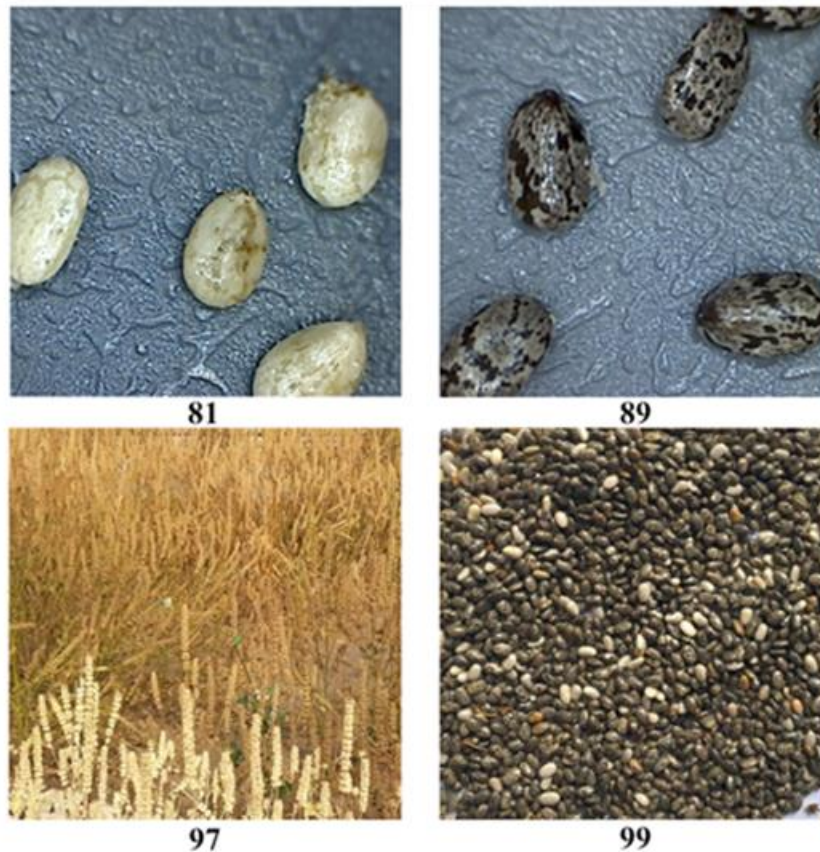


Figura 2.3. Etapas fenológicas para el período de llenado de grano de chía (*Salvia hispanica* L.) según la escala BBCH. 81 = granos inmaduros con pericarpio amarillo pálido; 89 = granos maduros con pericarpio marrón grisáceo; 97 cultivo seco y maduro; 99 = granos cosechados.

2.4 Conclusiones

En este capítulo de la tesis se ha logrado desarrollar una escala fenológica estandarizada para la chía en base al método propuesto por BBCH. La escala consistió en ocho etapas de crecimiento principales que abarcaron el período desde la germinación hasta la senescencia de las hojas. Las etapas 0 a 2 representan la fase vegetativa en la que se establece el número final de hojas y el dosel de cultivo; las etapas 5 a 8 representan la fase reproductiva en la que se determina el número y el tamaño de los granos; la etapa 9 representa la senescencia de las hojas y el cultivo listo para cosechar. Las etapas de crecimiento secundarias críticas que deben tenerse en cuenta para diseñar prácticas de manejo a campo en chía son 09 y 50 a 65. La etapa 09 corresponde al establecimiento del cultivo, por lo que en ella se define el estand de plantas del mismo, mientras que las etapas desde 50 a 65 corresponden a la formación de verticilastros y flores, etapas donde se determina el número máximo de flores fértiles capaces de ser fecundadas (y por ende el número potencial de granos). La escala BBCH para chía representa un importante avance en el conocimiento ya que es una herramienta práctica y de fácil aplicación para uso rutinario por parte de productores, investigadores y mejoradores de

este cultivo. La misma es fundamental en el desarrollo de los siguientes capítulos de esta tesis.

2.5 Bibliografía

- Agusti, M., S. Zaragoza, H. Bleiholder, L. Buhr, H. Hack, R. Klose y R. Stauss, 1995: Escala BBCH para la descripción de los estadios fenológicos del desarrollo de los agrinos (Gén. *Citrus*). Levante Agrícola 3, 189-199.
- Anuch Tiranti, J.V., Diez, J., Acreche, M.M., 2016. Determinación del período crítico para la generación del rendimiento en chía (*Salvia hispanica* L.). Actas de la XXXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal, Corrientes, Argentina, 13-16 de noviembre de 2016, pp. 104.
- Arcila-Pulgarín, J., Buhr, L., Bleiholder, H., Hack, H., Meier, U., Wicke, H., 2002. Application of the extended BBCH scale for the description of the growth stages of coffee (*Coffea spp.*). Annals of Applied Biology, 141(1), 19-27.
- Awadhwal, N.K., Thierstein, G.E., 1985. Soil crust and its impact on crop establishment: a review. Soil Tillage Res., 5, 289–302.
- Ayerza, R., Coates, W., 2009. Influencia del medio ambiente en el período de crecimiento y el rendimiento, el contenido de proteínas, aceite y α -linolénico de tres selecciones de chía (*Salvia hispanica* L.). Ind. Crops Prod, 30, 321-324.
- Baginsky, C., Arenas, J., Escobar, H., Garrido, M., Valero, N., Tello, D., Pizarro, L., Valenzuela, A., Morales, L., Silva, H., 2016. Growth and yield of chia (*Salvia hispanica* L.) in the Mediterranean and desert climates of Chile. Chil. J. Agr. Res. 76, 255–264.
- Bianchi, A.R., 1996. Temperaturas medias estimadas para la región noroeste de Argentina. Ed. INTA, Salta, Argentina, 14 pp. Bianchi, A.R., Yáñez, C.E., Acuña, L.R., 2005. Base de datos mensuales de precipitaciones del Noroeste Argentino. Ed. INTA, Salta, Argentina, 41 pp.
- Bleiholder, H., Van Den Boom, J., Langelüddeke, P., Stauss, R., 1989. Einheitliche codierung der phänologischen stadien bei kultur-und schadpflanzen. Gesunde Pflanzen, 41(11), 381-384.
- Bochicchio, R., Rossi, R., Labella, R., Bitella, G., Perniola, M., Amato, M., 2015. Efecto de la densidad de siembra y la fertilización con nitrógeno en la capa superior sobre el crecimiento y rendimiento de la chía (*Salvia hispanica* L.) en un entorno mediterráneo: primeros resultados Ital. J. Agron., 10, 163-166.

- Diez, J., Anuch Tiranti J.V., Sadras V.O., Acreche, M.M. 2021. The critical period for grain yield in chia (*Salvia hispanica* L.). Crop & Pasture Science. Accepted.
- Feller, C., H. Bleiholder, L. Buhr, H. Hack, M. Hess, R. Klose, U. Meier, R. Stauss, T. Van Den Boom y E. Weber, 1995a: Phänologische Entwicklungsstadien von Gemüsepflanzen: I. Zwiebel-, Wurzel-, Knollen- und Blattgemüse. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. 47, 193-206.
- Feller, C., H. Bleiholder, L. Buhr, H. Hack, M. Hess, R. Klose, U. Meier, R. Stauss, T. Van Den Boom und E. Weber, 1995b: Phänologische Entwicklungsstadien von Gemüsepflanzen: II. Fruchtgemüse und Hülsenfrüchte. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. 47, 217-232.
- Gonzales, R., Ruiz-Silvera, C., Bleiholder, H., Hack, H., Meier, U., Wicke, H., 2002. Proposal for codification of the phenological cycle of edible musaceae. In Proceedings of XV Reunión Internacional ACORBAT Meeting, pp. 412-417.
- Hack, H., Gall H., Klemke T., Klose R., Meier U., Stauss R., Witzenberg A., 1993: Phänologische Entwicklungsstadien der Kartoffel (*Solanum tuberosum* L.). Codierung und Beschreibung nach der erweiterten BBCH-Skala mit Abbildungen. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd, 45 (1), 11-19.
- Hess, M., Barralis, G., Bleiholder, H., Buhr, L., Eggers, T. H., Hack, H., Stauss, R., 1997. Use of the extended BBCH scale - general for the descriptions of the growth stages of mono; and dicotyledonous weed species. Weed research, 37(6), 433-441.
- Lancashire, P. D., Bleiholder, H., Boom, T. V. D., Langelüddeke, P., Stauss, R., Weber, E., Witzengerger, A., 1991. Un código decimal uniforme para las etapas de crecimiento de cultivos y malezas. Ann. Appl. Biol., 119, 561-601.
- Lorenz, D. H., K. W. Eichhorn, H. Bleiholder, R. Klose, U. Meier, E. Weber, 1994: Phänologische Entwicklungsstadien der Weinrebe (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*). Vitic. Enol. Sci. 49, 66-70.
- Meier, U., Bachmann, Buhtz, L. E., Hack, H., Klose, R., Märländer, B., Stauss, R., Weber, E., 1993: Phänologische Entwicklungsstadien der Beta-Rüben (*Beta vulgaris* L. ssp.). Codierung und Beschreibung nach der erweiterten BBCH-Skala mit Abbildungen. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd, 45 (2), 37-41.
- Meier, U., Graf, H. Hack, H., Hess, M., Kennel, W., Klose, R., Mappes, D., Seipp, D., Stauss, R., Streif, J., Van Den Boom, T., 1994: Phänologische Entwicklungsstadien des Kernobstes (*Malus doméstica* Borkh. und *Pyrus communis* L.) des Steinobstes

- (Prunus-Arten), der Johannisbeere (Ribes-Arten) und der Erdbeere (*Fragaria x ananassa* Duch.). Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. 46 (7), 141-153.
- Meier, U., Bleiholder, H., Buhr, L., Feller, C., Hack, H., Heb, M., Lancashire, P. D., Schnock, U., Staub, R., Van Den Boom, T., 2009. El sistema BBCH para codificar las etapas de crecimiento fenológico de las plantas: historia y publicaciones. J. für Kulturpflanzen, 61, 41-52. Munger et al, 1997
- Munger, P., Bleiholder, H., Hack, H., Hess, M., Stauss, R., Van Den Boom, T., Weber, E. 1997: Phenological growth stages of the soybean plant (*Glycine max* L. [Merr]). Codification and description according to the general BBCH scale – with figures. Journal of Agronomy and Crop Science, 179, 209-217.
- Munger, P., Bleiholder, H., Hack, H., Hess, M., Stauss, R., Van Den Boom, T., Weber, E., 1998a: Phenological growth stages of the cotton plant (*Gossypium hirsutum* L.). Codification and description according to the BBCH scale – with figures. Journal of Agronomy and Crop Science, 180, 143-149.
- Munger, P., Bleiholder, H., Hack, H., Hess, M., Stauss, R., Van Den Boom, T., Weber, E., 1998b: Phenological growth stages of the peanut plant (*Arachis hypogaea* L.). Codification and description according to the BBCH scale – with figures. Journal of Agronomy and Crop Science, 180, 101-107.
- Munger, P., Bleiholder, H., Hack, H., Hess, M., Stauss, R., Boom, T., Weber, E., 2008a. Etapas de crecimiento fenológico de la planta de soja (*Glycine max* L. [Merr.]): Codificación y descripción según la escala BBCH. J. Agron. Crop Sci., 179, 209-217.
- Munger, P., Bleiholder, H., Hack, H., Hess, M., Stauss, R., Boom, T., Weber, E., 2008b. Etapas de crecimiento fenológico de la planta de algodón (*Gossypium hirsutum* L.): codificación y descripción según la escala BBCH. J. Agron. Crop Sci., 180, 143-149. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037x.1998.tb00384.x> 296
- Purcell, L.C., Ball, R.A., Reaper, J.D., Vories, J.D., 2002. Radiation use efficiency and biomass production in soybean at different plant population densities. Crop Sci. 42, 172–177.
- Rossbauer, G., L. Buhr, H. Hack, S. Hauptmann, R. Klose, U. Meier, R. Stauss y E. Weber, 1995: Phänologische Entwicklungsstadien von KulturHopfen (*Humulus lupulus* L.), 249-253.
- Sanz-Cortés, F., Martínez-Calvo, J., Badenes, M. L., Bleiholder, H., Hack, H., Llacer, G., Meier, U., 2002. Etapas de crecimiento fenológico de los olivos (*Olea europaea* L.). Ana. Appl. Biol., 140, 151-157.

- Setter, T.L., Waters, I., 2003. Review of prospects for germplasm improvement for waterlogging tolerance in wheat, barley and oats. *Plant Soil* 253, 1–34.
- Silva, H., Arraigada, C., Campos-Saez, S., Baginsky, C., Castellaro-Galdames, G., Morales Salina, L., 2018. Effect of sowing date and water availability on growth of plants of chia (*Salvia hispanica* L.) established in Chile. *PLoS One* 13 (9), 1–20.
- Sosa-Zuniga, V., Brito, V., Fuentes, F., Steinfort, U., 2017. Phenological growth stages of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) based on the BBCH scale. *Annals of Applied Biology*, 171(1), 117-124.
- Victoria F., et al., 2010. Iniciativas para una economía baja en carbono. Cambio Climático en la Región de Murcia. Trabajos del Observatorio Regional del Cambio Climático. Conserjería de Agricultura y Agua. ISBN: 978-84-693-8114-4.
- Van den Boogaard, R., Veneklaas, E. J., Peacock, J. M., Lambers, H., 1996. Yield and water use of wheat (*Triticum aestivum* L.) in a Mediterranean environment: Cultivar differences and sowing density effects. *Plant Soil* 181, 251–262.
- Weber, E., Bleiholder, H., 1990. Erläuterungen zu den BBCH-dezimal-codes für die entwicklungsstadien von mais, raps, faba-bohne, sonnenblume und erbsen mit abbildungen. *Gesunde Pflanzen*, 42(9), 308-321.
- Weiner, J., Griepentrog, H. W., Kristensen, L., 2001. Suppression of weeds by spring wheat (*Triticum aestivum* L.) increases with crop density and spatial uniformity. *J. Appl. Ecol.* 38, 784–790.
- Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F., 1974. Un código decimal para las etapas de crecimiento de los cereales. *Weed Res.*, 14, 415-421.

Capítulo 3

Respuestas del desarrollo de chíá a variaciones en el termo-fotoperíodo

(De este capítulo deriva la publicación: Developmental responses of chia (*Salvia hispanica* L.) to variations in thermo-photoperiod: impact on subcomponents of grain yield. Pérez Brandán *et al.*, 2020. *Crop & Pasture Science* 71: 183-189. <https://doi.org/10.1071/CP19218>).

3.1 Introducción

El aumento en el consumo mundial de chíá (*Salvia hispanica* L.) está asociado a que sus granos tienen una mayor concentración de ácido graso omega-3 (64%) respecto a otros cultivos de granos (Ayerza, 1995; Ayerza y Coates, 2011). Este cultivo presenta un rendimiento global promedio de grano en todo el mundo de ~ 500 kg ha⁻¹ (Scalise, 2014). Este relativamente bajo rendimiento podría estar asociado con el escaso conocimiento básico del desarrollo y crecimiento de este cultivo. Por lo tanto, disponer de esta información podría ayudar al diseño de mejores prácticas de manejo (como ser la fecha de siembra óptima que mejor se ajuste a los requerimientos del cultivo) y así lograr mayores rendimientos de grano.

La chíá es un cultivo de verano que no tolera heladas (Bochicchio *et al.*, 2015) y se caracteriza como una planta de día corto (Jamboonsri *et al.*, 2012; Baginsky *et al.*, 2016). Por lo tanto, para tener un ciclo vegetativo-reproductivo equilibrado con inflorescencias fértiles, la ventana para el período de crecimiento es estrecha y debe abarcar las condiciones ambientales óptimas para este cultivo.

El fotoperíodo y la temperatura son factores ambientales claves que gobiernan el desarrollo y el crecimiento de los cultivos (por ejemplo, Major 1980; Miralles *et al.*, 2004). Major (1980) y Major y Kiniry (1991) propusieron un modelo para cuantificar la respuesta al fotoperíodo durante el tiempo hasta la floración. Este modelo se ha utilizado para caracterizar la respuesta de las plantas como plantas de día corto o de día largo. Sin embargo, hasta donde sabemos, pocos estudios han informado la respuesta de la chíá al termo-fotoperíodo. Jamboonsri *et al.* (2012) afirmaron que el germoplasma de chíá domesticado induce a floración con 12 horas o menos de fotoperíodo. Baginsky *et al.* (2016) reportaron que la chíá necesitaba 500 grados día para alcanzar el comienzo de la floración cuando el fotoperíodo era igual o inferior a 11,8 horas de luz (umbral fotoperiodico). Sin embargo, estos estudios no se ajustan a un modelo matemático que permita determinar con precisión el umbral del comienzo de la floración y, por lo tanto, sus determinaciones son más cualitativas que cuantitativas. Además, en esos estudios el período previo a la floración se consideró como una sola etapa, mientras que se

ha demostrado que las fases previas a la floración de varios cultivos muestran diferentes sensibilidades al fotoperíodo (por ejemplo, Miralles et al., 2001; Whitechurch et al., 2007).

Reportes previos indican que el fotoperíodo afecta la duración de las diferentes fases previas a la floración (Mayor y Kiniry, 1991). Los mismos autores afirmaron que, en el cultivo de maíz, fotoperíodos no óptimos extendieron las fases pre- y post-inductiva diferenciando más primordios de hojas. Por lo tanto, se produce una dependencia de fases con un retraso en el momento de floración debido a un aumento en el tiempo térmico requerido para el cese de la aparición de hojas. En trigo (Slafer y Rawson 1994, 1995) y cebada (Kernich et al., 1996), fotoperíodos no óptimos extendieron la duración de la sub-fase reproductiva tardía (espiguilla terminal-antes de la anthesis en el caso de trigo) sin cambios en el número final de hojas. El hecho de que la magnitud de respuesta al fotoperíodo de las etapas particulares que componen el ciclo hasta la floración pueda diferir entre etapas en trigo (Slafer y Rawson 1994; Gonzalez et al., 2002) sugirió que su control podría ser independiente, al menos parcialmente (Pérez Gianmarco, 2021). Ello permitiría manipular la respuesta al fotoperíodo de una etapa (y así, su duración) sin afectar en forma importante la respuesta en las otras etapas.

Los cambios en los subcomponentes tempranos del rendimiento de grano (por ejemplo, el crecimiento de espigas en trigo o cebada, o la generación de flores fértiles en colza) se han asociado con la duración de las fases de pre-floración (Hay y Kirby, 1991; Slafer y Rawson, 1994; Miralles et al., 2001; Pedro et al., 2011). Además, los aumentos en el número de granos en el trigo (por ejemplo, Fischer y Stockman, 1980; Dreccer et al., 2014) y la cebada (por ejemplo, Miralles et al., 2000) se relacionaron con cambios en estos subcomponentes de pre-floración. El rendimiento del grano, a su vez, se explica universalmente por el número de granos (Slafer et al., 2005), como también se observó en la chía (Anuch Tiranti et al., 2016).

Es de esperar que, como ocurre en otros cultivos, variaciones en las condiciones del termo-fotoperíodo puedan cambiar la duración de las fases previas a la floración en chía. Estos cambios podrían afectar, en la fase de pre-floración de éste cultivo, subcomponentes tempranos del rendimiento de grano. En consecuencia, los aumentos en el peso seco del verticilastro en floración (PSV_{FL}) estarían relacionados con una mayor duración de las fases previas a la floración. El objetivo de este capítulo es (i) determinar las respuestas de desarrollo en pre-floración de la chía a variaciones en las condiciones del termo-fotoperíodo, y (ii) explorar el impacto de estos cambios en el PSV_{FL} y el rendimiento de grano. Dado que para expresar la duración de fases en tiempo térmico se requiere conocer la temperatura base de crecimiento del cultivo, y como la misma no se ha determinado aún, un objetivo accesorio de este capítulo es establecer las temperaturas base, óptima y máxima, es decir las temperaturas cardinales de crecimiento y desarrollo de la chía.

3.2 Materiales y Métodos

3.2.1 Ensayo bajo condiciones controladas

Para poder expresar todas las duraciones de fases del cultivo en tiempo térmico, se determinaron las temperaturas cardinales de desarrollo (base, óptima y máxima) de la chíá. Para ello se realizó un ensayo en condiciones controladas utilizando como tratamientos dos genotipos de chíá y ocho temperaturas de crecimiento: 6, 10, 14, 18, 22, 26, 30 y 34°C. Los genotipos de chíá (poblaciones) son ampliamente cultivados por productores de la zona y poseen diferentes colores de flores y granos: chíá con flores blancas y granos color blanco y chíá con flores púrpuras y granos mezcladas (blancos, beige y marrón grisáceo).

Para el ensayo se utilizó una cámara de crecimiento marca PeetLab programable modelo MGC-350HPY-2. Este modelo tiene una capacidad de 300 litros, trabaja en el rango de temperaturas de -10 a 60°C con una precisión de $\pm 4\%$ (en condiciones estables), cuenta con un sistema de vapor refrigerado, sistema calefactor, ventilador de recirculación de aire termoregulado, bobina de deshumificación y doble puerta: una externa de metal y una interna de vidrio. El sistema de iluminación esta conformado por 18 tubos fluorescentes (seis en cada una de las tres puertas laterales) que emiten luz de día blanca fría (6500 °K) en el espectro visible (420-780 nm), con una intensidad de 2000 watts m⁻². El sistema de control de los valores de humedad y temperatura, es realizado por dos microprocesadores trabajando en un sistema PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Los controladores están ubicados en el panel de comando frontal del equipo. (Figura 3.1).

Para cada tratamiento de temperatura se realizaron dos repeticiones. En cada repetición, se utilizaron 36 plantas (18 plantas de cada genotipo) distribuidas al azar en las tres bandejas de la incubadora de crecimiento. Las plantas se cultivaron en macetas individuales de 0,3 L y se utilizó como sustrato una mezcla de perlita, vermiculita (ambos de marca Terrafertil) y turba (marca Klasmann) (1:1:2). De manera frecuente, las macetas se rotaron dentro y entre los estantes para evitar efectos asociados a su posición en la incubadora de crecimiento.

De cada planta se registraron los datos de días hasta emergencia (E), días hasta aparición del primer par de hojas expandidas (1PHE) y días hasta aparición del verticilastro en el tallo principal (AV). Durante el periodo de tiempo que transcurrió entre E y 1PHE, la incubadora estuvo seteada a 25°C con condiciones de fotoperíodo de diez horas de luz y 14 horas de oscuridad y humedad relativa del aire de 70%, periodo denominado de “pre-tratamiento”. Estas condiciones ambientales se las consideró como de crecimiento óptimo y no-inductivas. Una vez alcanzado el 1PHE, la cámara de crecimiento se programó para recrear las condiciones naturales inductivas de una planta de día corto, con 15 horas de oscuridad y nueve horas de luz diaria, una humedad relativa del aire de 70% y la correspondiente

temperatura del tratamiento (6 a 34 °C). Como la incubadora presenta tubos que aseguran una baja intensidad en la longitud de onda perteneciente al rojo (660-680 nm) y rojo lejano (720-740 nm), y la relación entre ambas longitudes de onda modulan la floración en condiciones naturales, la puerta externa de la incubadora se abrió todos los días que duraron los ensayos, por un periodo de nueve horas. La puerta de vidrio interna permaneció cerrada, de esa manera la incubadora no sufrió alteraciones en cuanto a la temperatura en su interior.

Para determinar las temperaturas cardinales de la chíá, se graficó la tasa de desarrollo en función de distintas temperaturas en el periodo que va desde aparición del 1PHE hasta AV. Para ello, se utilizaron las inversas de las duraciones (duraciones expresadas en días) en ese período, en función de las temperaturas (temperaturas expresadas en grados centígrados). Para ajustar los datos se utilizó un modelo bilineal (adaptado de Andrade y Sadras, 2002). El modelo propuesto se muestra en la Ecuación 3.1 y fue realizado utilizando el software InfoStat 2017 (Di Rienzo et al., 2017).

$$y \text{ (día}^{-1}\text{)} = (m1 \cdot (\text{temperatura} - T_b)) \text{ (si } \text{temperatura} \leq T_{op}\text{)} + ((m1 \cdot (T_{op} - T_b) + m2 \cdot (\text{temperatura} - T_{op})) \text{ (si } \text{temperatura} > T_{op}\text{)})$$

(Ecuación 3.1)

Donde;

y: representa el valor que asume la tasa de desarrollo; (día⁻¹),

m1: es la pendiente de la recta cuando la variable independiente asume valores de temperatura entre temperatura base (T_b) y temperatura óptima (T_{op}).

m2: es la pendiente de la recta cuando la variable independiente asume valores superiores a T_{op}.

T_b (temperatura base): representa aquel valor de temperatura mínima en la cual la tasa de desarrollo para la fase 1PHE-AV se hace cero (°C).

T_{op} (temperatura óptima): representa aquel valor de temperatura en el cual la tasa de desarrollo para el período 1PHE-AV se hace máxima y la duración de ésta etapa ontogénica es mínima.

El modelo bilineal presentado estima los parámetros m1, T_b, m2 y T_{op}, de manera que la temperatura máxima (T_{máx}) puede ser estimada como la proyección de la recta de regresión hasta su intercepción con el eje de las abscisas cuando los valores de la tasa de desarrollo adquieren valores de cero (Figura 3.2), o bien a través de la Ecuación 3.2 como se presenta a continuación:

$$T_{\text{máx}} = ((-m1*(Top-Tb)) + (m2*Top))/m2 \quad (\text{Ecuación 3.2})$$



Figura 3.1. Imagen digitalizada de la incubadora de crecimiento donde se puede observar el sistema operativo de funcionamiento.: (1) Sistema de control con microprocesador de control de temperatura, luz y humedad (*) ubicado en la parte superior interna de la incubadora, (2) Pantalla digital de sistema de control, (3) Puerta exterior de metal, (4) Puerta interior vidrio, (5) Sistema de iluminación, (6) Humidificador, (7) Sensores de humedad y temperatura, (8) Sistema de circulación de aire, (9) Sistema de refrigeración tipo alternativo de compresor hermético.

3.2.2 Experimento de campo

El ensayo se realizó en la Estación Experimental Salta del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, localizada en la localidad de Cerrillos (24°53'32''S, 65°28'26''O; 1235 m.s.n.m.), en la Provincia de Salta. El mismo se condujo durante los ciclos agrícolas 2015-2016, 2017 y 2018 (verano austral) en un suelo Ustocrept Údico (USDA Soil Taxonomy; Soil Survey Staff, 2014) con 2,6 % de materia orgánica. La temperatura media se obtuvo de la estación meteorológica ubicada a 500 metros de las parcelas experimentales.

El ensayo consistió en la combinación de fechas de siembra y genotipos. Se utilizaron seis fechas de siembra para el primer (2015-2016) y segundo (2017) ciclo agrícola, y cinco fechas de siembra para el tercer ciclo agrícola (2018), totalizando 17 fechas de siembra para todo el ensayo (Figura 3.4). Las fechas de siembra evaluadas en el primer ciclo agrícola fueron 15 de diciembre (FS1), 5 de enero (FS2), 3 de febrero (FS3), 8 de marzo (FS4), 29 de marzo (FS5) y 19 de abril (FS6); las evaluadas en el segundo ciclo agrícola fueron 3 de enero (FS1), 24 de enero (FS2), 7 de febrero (FS3), 21 de febrero (FS4), 3 de marzo (FS5) y 14 de marzo (FS6); las evaluadas en el tercer ciclo agrícola fueron 1 de febrero (FS1), 15 de febrero (FS2), 26 de febrero (FS3), 1 de marzo (FS4) y 6 de marzo (FS5). Como se puede observar en la Figura 3.4, las fechas de siembra correspondientes al 29 de marzo y al 19 de abril de 2016 no llegaron a floración debido a heladas tempranas ocurridas entre el 22 y 23 de junio de 2016. Sin embargo, y a fines de observar el cambio del eje vegetativo a reproductivo, se pudo incorporarlas en los análisis llevados a cabo en este capítulo. Los dos genotipos de chíá evaluados son los mencionados en el punto 3.2.1.

Bajo condiciones de cultivo en Argentina, las poblaciones de chíá mencionadas tienen una duración del ciclo del cultivo de 140-165 días. Los tratamientos (fechas de siembra y genotipos) se arreglaron en un diseño factorial anidado, con combinaciones cruzadas de genotipos y fechas de siembra anidadas dentro de los ciclos agrícolas y bloques anidados dentro de las combinaciones cruzadas de ciclos agrícolas y fechas de siembra. El tamaño de la unidad experimental (parcelas) fue de 40,56 m² conformado por seis hileras con un espacio entre hileras de 0,52 metros y 13 metros de largo. Las parcelas se sembraron con altas densidades de siembra y se ralearon manualmente poco después de la emergencia de las plántulas a una densidad final de 20 plantas m⁻² para todas las fechas de siembra. Para complementar la lluvia y evitar el déficit de agua, las parcelas se regaron por goteo durante todo el ciclo de crecimiento. Para prevenir daños asociados a hongos e insectos se aplicaron fungicidas e insecticidas recomendados. Las malezas fueron removidas manualmente durante todo el ciclo del cultivo. Debido a la alta fertilidad del suelo (> 2,6 % de materia orgánica en la capa superior del suelo de 0,20 m), las parcelas no fueron fertilizadas.

3.2.2.1 Muestreo y mediciones para el experimento de campo

Luego de la emergencia del cultivo (E), se marcaron cinco plantas de idéntico desarrollo y crecimiento en cada sub-parcela. Las plantas marcadas fueron identificadas y seguidas individualmente para poder registrar las fechas de ocurrencia de las siguientes fases fenológicas: 1PHE, AV e iFL (iniciación floral en el tallo principal). Además, se contó el número total de hojas expandidas acumuladas (NFH) desde E hasta iFL. La periodicidad de las observaciones fue de dos veces por semana durante la etapa mencionada. De manera paralela a las observaciones de plantas individuales, se registró el momento en el que el cincuenta por ciento de las plantas de cada sub-parcela llegó a alguno de los estados fenológicos mencionados precedentemente. Para tener registro de los cambios internos que sucedían a nivel de ápice del tallo principal, se tomaron muestras de dos plantas por cada sub-parcela, cada cuatro días para fechas de siembra tempranas, y cada dos o tres días para fechas de siembras tardías. De esa manera, haciendo uso de un microscopio binocular, se logró determinar el momento de inducción del ápice (IA). Ese momento se registró como aquel donde se observó una estructura en forma de *domo* y coincidió con un cambio de textura que indica el cese en la aparición de primordios foliares con la subsiguiente aparición de primordios florales. Este criterio es usado comúnmente como indicador del cambio de la fase vegetativa a reproductiva en especies como el trigo (Miralles et al., 2010) y menta (género Lamiaceae; Naghiloo et al., 2014).

Las fases fenológicas previas a la floración registradas corresponden a aquellas descritas según el sistema de codificación decimal BBHC (Capítulo 2; Pérez Brandán et al., 2019). Así, el estado fenológico de 1PHE corresponde al código 11, el estado fenológico AV corresponde al código 50 y el estado fenológico iFL corresponde al código 61. No existe codificación en dicha escala para el estado IA, ya que la misma explora solo aspectos externos del desarrollo del cultivo.

El intervalo entre dos sub-fases fenológicas se expresó utilizando unidades de tiempo térmico (TT, °Cd). Para ello, se utilizó la temperatura base (T_b) de la chíá obtenida en el punto 3.2.1 (T_b = 6 °C). El tiempo térmico se calculó restando a la temperatura media del aire la temperatura base para todas las sub-fases previas a floración (E-1PHE, 1PHE-IA, IA-AV, y AV-iFL). En la floración y cosecha (fines de junio hasta fines de julio, dependiendo de la fecha de siembra), todas las plantas en 0,5 m² de los dos surcos centrales de cada parcela (eliminando los efectos de borde) de los ciclos agrícola 2017 y 2018 fueron cosechadas para determinar el PSV_{FL} y el rendimiento de grano. Las muestras se secaron en estufa durante 72 horas a 65 °C hasta peso constante.

El porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (R_i) se midió en cada sub-parcela semanalmente durante todo el ciclo del cultivo. Para ello se utilizó un ceptómetro digital marca Cavadevices (Cavadevices, Buenos Aires, Argentina) modelo Bar-Rad 50, que detecta el flujo de fotones recibidos en un metro lineal. Se tomaron tres mediciones por sub-parcela al mediodía en días soleados, realizando una medición superior y dos inferiores al canopeo. La medición superior refleja el total de fotones incidentes en un momento dado. Las mediciones inferiores reflejan los fotones no interceptados (fotones transmitidos) por el cultivo. Posteriormente se calculó el porcentaje de la radiación incidente que es interceptada por el cultivo como se muestra en la Ecuación 4.1.

$$R_i (\%) = \frac{\text{Fotones incidentes} - \text{Fotones transmitidos}}{\text{Fotones incidentes}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Se calculó la radiación interceptada acumulada (RIA) entre dos mediciones consecutivas como el producto entre el promedio de intercepción de la radiación de dos mediciones consecutivas y la radiación incidente acumulada entre dichas mediciones. Para obtener la radiación interceptada acumulada entre estadios fenológicos seleccionados, se realizó la sumatoria de las RIA en dichos períodos. La radiación incidente es la sumatoria para un período de la radiación total incidente diaria, datos que provinieron de la estación meteorológica de la EEA del INTA Salta, distante a 500 m del ensayo.

Se calculó la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) desde emergencia (E) a MF mediante la relación entre la biomasa seca total acumulada y la RIA durante el ciclo del cultivo como se muestra en la Ecuación 4.2.

$$\text{EUR (g MJ}^{-1}\text{)} = \frac{\text{BST (g m}^{-2}\text{)}}{\text{RIA (MJ m}^{-2}\text{)}} \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

3.2.2.3 Análisis estadísticos para el experimento de campo

Dado que, el análisis del modelo compuesto que consideraba a los ciclos agrícolas como fuente de variación (la combinación de genotipos y fechas de siembra se encontraban anidadas dentro de los ciclos agrícolas) mostró que los ciclos agrícolas no contribuían significativamente a la variabilidad de la interacción entre fechas de siembra (FS) y genotipos (G), se pudo descartar su efecto y utilizar un modelo simplificado que integró todos los datos sin considerar los ciclos agrícolas. Se utilizó un análisis de varianza combinado (ANOVA) para evaluar los efectos del genotipo (G), la fecha de siembra (FS) y su interacción (G x FS) sobre el TT para las sub-fases fenológicas antes mencionadas, el PSV_{FL} y el rendimiento de grano.

Dado que por cuestiones ambientales se perdieron algunos bloques o fechas de siembra entre los ciclos agrícolas, los componentes de la varianza se calcularon utilizando la suma de cuadrados de Tipo III. El análisis se realizó mediante el procedimiento PROC GLM de SAS / STAT 9,2 (SAS Institute, Cary, NC, EE. UU.).

El enfoque general de Major y Kiniry (1991) se utilizó para caracterizar la respuesta fotoperiódica para la duración en TT desde 1PHE hasta iFL, y para las otras sub-fases anteriores a la floración. Se ajustó un modelo bilineal para la relación entre TT y el fotoperíodo medio del periodo considerado (P):

$$\begin{aligned} TT &= a+b*c, \text{ si } P \leq c \\ TT &= a+b*P, \text{ si } P > c \end{aligned} \quad \text{(Ecuación 3.5)}$$

Donde;

TT: es el tiempo térmico de la fase o sub-fase,

a: representa la intersección del eje y de la regresión lineal,

b: representa la pendiente de la regresión lineal,

c: representa el fotoperíodo umbral.

El término $a + b * c$ representa a la fase vegetativa básica y corresponde a la duración mínima desde 1PHE hasta iFL cuando el fotoperíodo es menor que c en plantas de días cortos (Major y Kiniry, 1991). Los fotoperíodos superiores a c aumentan la duración desde 1PHE hasta iFL de acuerdo con la sensibilidad al fotoperíodo (b). El modelo bilineal se ajustó utilizando el software TableCurve 3.0 (Systat Software, San José, CA, EE. UU.).

Para determinar la importancia y la magnitud de las relaciones entre el PSV_{FL} , el rendimiento de grano y la duración de las sub-fases fenológicas, se realizaron análisis de regresión lineal. Estos análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete InfoStat versión 2017 (Di Rienzo et al., 2017).

3.3 Resultados

3.3.1 Temperaturas cardinales de la chíá

Los parámetros ajustados por el modelo bilineal fueron similares para ambos genotipos, por ello se usaron los promedios de los valores. En la Figura 3.2 se muestra como la tasa de desarrollo del cultivo aumenta linealmente a partir de la temperatura base (parámetro T_b en la Ecuación 3.1) cuyo valor fue $5,6^{\circ}\text{C}$ ($\sim 6^{\circ}\text{C}$) hasta alcanzar su tasa máxima cuando la temperatura alcanza un valor de $20,2^{\circ}\text{C}$ (parámetro T_{op} en la Ecuación 3.1). A partir de allí, la tasa de desarrollo vuelve a declinar linealmente hasta alcanzar la $T_{m\acute{a}x}$ de 47°C

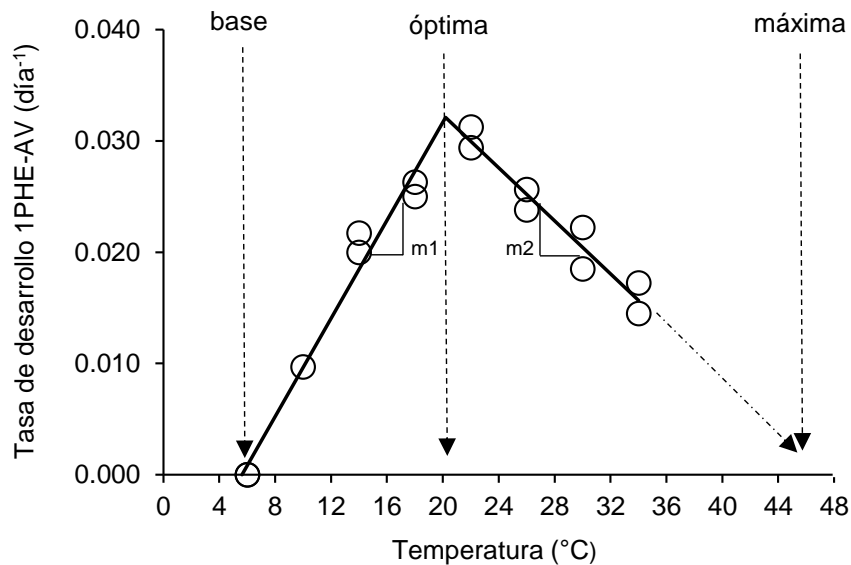


Figura 3.2. Tasa de desarrollo en función de la temperatura para la sub-fase 1PHE a AV de chíá. Los puntos representan los valores reales (se promediaron genotipos), la línea sólida el ajuste de la función bilineal, y la línea punteada representa la proyección de la curva descendente mostrando el punto de corte de la temperatura máxima. En el eje de las abscisas se indican también las temperaturas base, óptima y máxima. y (día⁻¹) = $(0,0022 * (temperatura - T_b))$ (si temperatura $\leq T_{op}$) + $((0,0022 * (T_{op} - T_b) + 0,0012 * (temperatura - T_{op}))$ (si temperatura $> T_{op}$). $R^2 = 0,97$; $p < 0,0001$.

3.3.2 Condiciones foto-termales y duración de las sub-fases de pre-floración

Las condiciones foto-termales para los tres ciclos agrícolas se muestran en la Figura 3.3. La evolución de la temperatura media entre mediados de diciembre y mediados de mayo fue similar para los años considerados en esta tesis. La temperatura media promedio para el ciclo 2015/16 fue de $19,80^{\circ}\text{C}$, para el ciclo 2017 de $20,80^{\circ}\text{C}$ y para el ciclo 2018 fue de $21,50^{\circ}\text{C}$. No se registraron heladas durante estos meses. Para este período, el fotoperíodo varió de 14,14 a 11,8 horas (Figura 3.3). Las temperaturas medias en el período diciembre-marzo fue relativamente constante para todos los ciclos agrícolas, promediando un valor de 21°C .

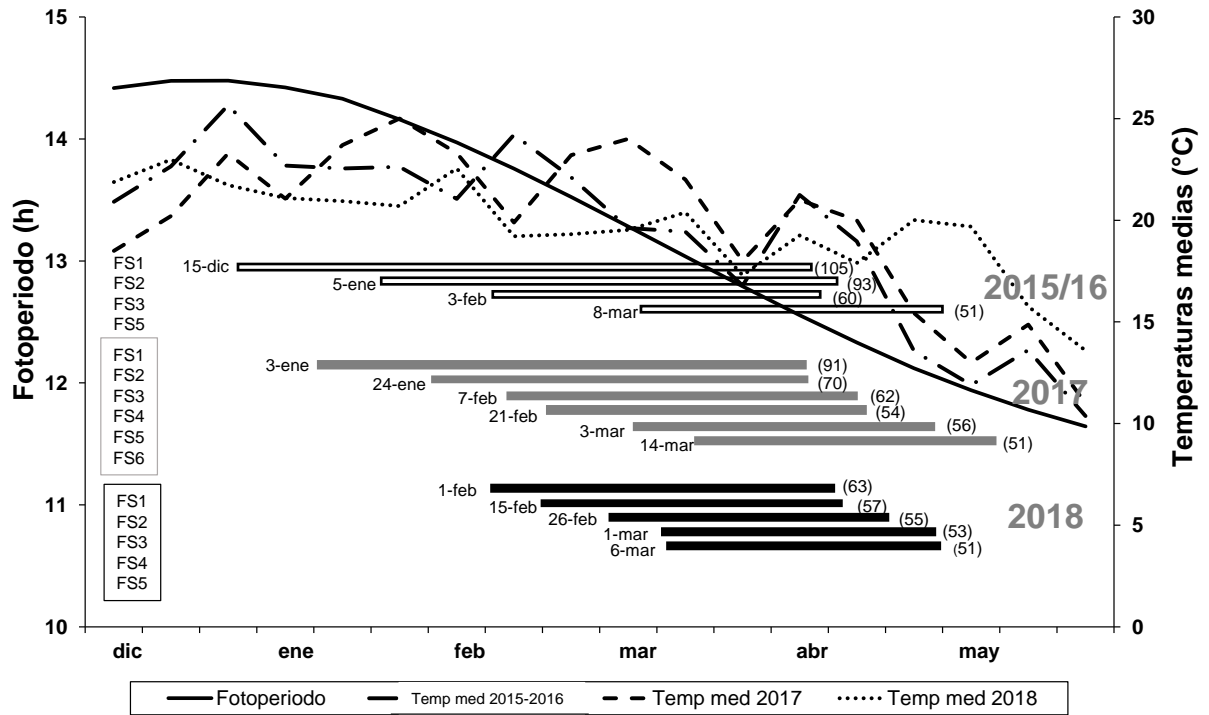


Figura 3.3. Temperaturas medias (líneas discontinuas) y fotoperíodo (línea continua) para los experimentos durante los ciclos agrícolas 2015-2016, 2017 y 2018. Las barras (y los números entre paréntesis en las mismas) representan la duración (en días calendarios) de la fase de desarrollo desde la emergencia hasta el inicio de la floración de diferentes fechas de siembra (FS) en chíá. Las fechas de siembra del 29/03 y 19/04 del 2016 no se muestran ya que las mismas no alcanzaron la floración.

El ANOVA reveló efectos significativos para las FS y la interacción entre FS x G para las sub-fases E–1PHE, 1PHE–IA, IA–AV y AV–iFL. El G tuvo efecto significativo para las sub-fases E–1PHE, IA–AV y AV–iFL. Sin embargo, para todas las variables, la FS fue el término que representó mayor proporción de variación, siendo los efectos del G y de la interacción G x FS de escasa relevancia biológica. Los dos genotipos de chíá tuvieron respuestas de desarrollo similares para las distintas fechas de siembra (Tabla 3.1 y Figura 3.4).

Tabla 3.1. Cuadrados medios para genotipos, fechas de siembra, interacción genotipo por fechas de siembra y bloques para la duración en tiempo térmico ($^{\circ}\text{Cd}$) de sub-fases en pre-floración, peso seco de verticilastro en floración (PSV_{FL} , g m^{-2}) y rendimiento de grano (g m^{-2}) en chíá.

Fuente de Variación	E-1PHE	1PHE-IA	IA-AV	AV-iFL	PSV _{FL}	Rendimiento
Genotipo (G)	134**	27	99**	4687**	72055	322228*
Fecha de Siembra (FS)	2550	217701**	49505**	12932**	253411**	3582571**
G × FS	57**	59**	32**	152**	18484	60645
Bloque	16	28	17**	55**	29690	82954

*p < 0,05; **p < 0,01. Las sub-fases en pre-floración son: emergencia (E) - primer par de hojas expandidas (1PHE); 1PHE - inducción del ápice (IA); IA - aparición del verticilastro (AV); AV - iniciación de la floración (iFL).

Las duraciones en días calendario de cada una de las fechas de siembra para todos los ciclos agrícolas pueden apreciarse en la Figura 3.3. Puede observarse que adelantar la fecha de siembra extendió la duración de la etapa E-iFL. Fechas de siembra tempranas (por ejemplo, FS1 2015-16 y FS1 2017, es decir, 15 de diciembre de 2015 y 3 de enero de 2017) mostraron las duraciones más largas (105 y 91 días, respectivamente), mientras que las fechas de siembra posteriores (por ejemplo, FS5 de 2016 y FS1 2018, es decir, 8 de marzo de 2016 y 1 de febrero de 2018) mostraron duraciones menores (rango de 63 a 51 días respectivamente). Este comportamiento fue similar en cada ciclo agrícola.

Las duraciones, en tiempo térmico, para todas las sub-fases de pre-floración a través de las fechas de siembra se muestran en la Figura 3.4. Hubo reducciones significativas en la duración de todas las sub-fases de pre-floración para ambos genotipos desde las fechas de siembra tempranas hasta las tardías. La duración de la sub-fase de pre-floración E-1PHE no se vio afectada por las fechas de siembra (Tabla 3.1). Para todas las sub-fases posteriores a E-1PHE y anteriores a la floración existió una reducción significativa en su duración debido al cambio del fotoperíodo. La reducción fue mayor entre las fechas de siembra de mediados de diciembre a mediados de febrero (desde el 15 de diciembre de 2015 al 15 de febrero de 2018, en la Figura 3.4).

Si bien es imposible en experimentos de campo separar los efectos térmicos de los fotoperiódicos, debido a que no hubo diferencias importantes en la temperatura media para la etapa de pre-floración entre las fechas de siembra (Figura 3.3), se puede especular que en el desarrollo de pre-floración de la chíá prima el efecto fotoperiódico por sobre el térmico (Figura 3.4). La duración de toda la fase previa a la floración desde E a iFL disminuyó de 1660 a 740 °Cd cuando la siembra se retrasó desde mediados de diciembre hasta mediados de febrero (Figura 3.4). Este comportamiento se reflejó en todas las sub-fases anteriores a la floración, excepto en la sub-fase E – 1PHE, que tuvo una duración promedio de 94 °Cd a lo largo de las distintas fechas de siembra (Figura 3.4).

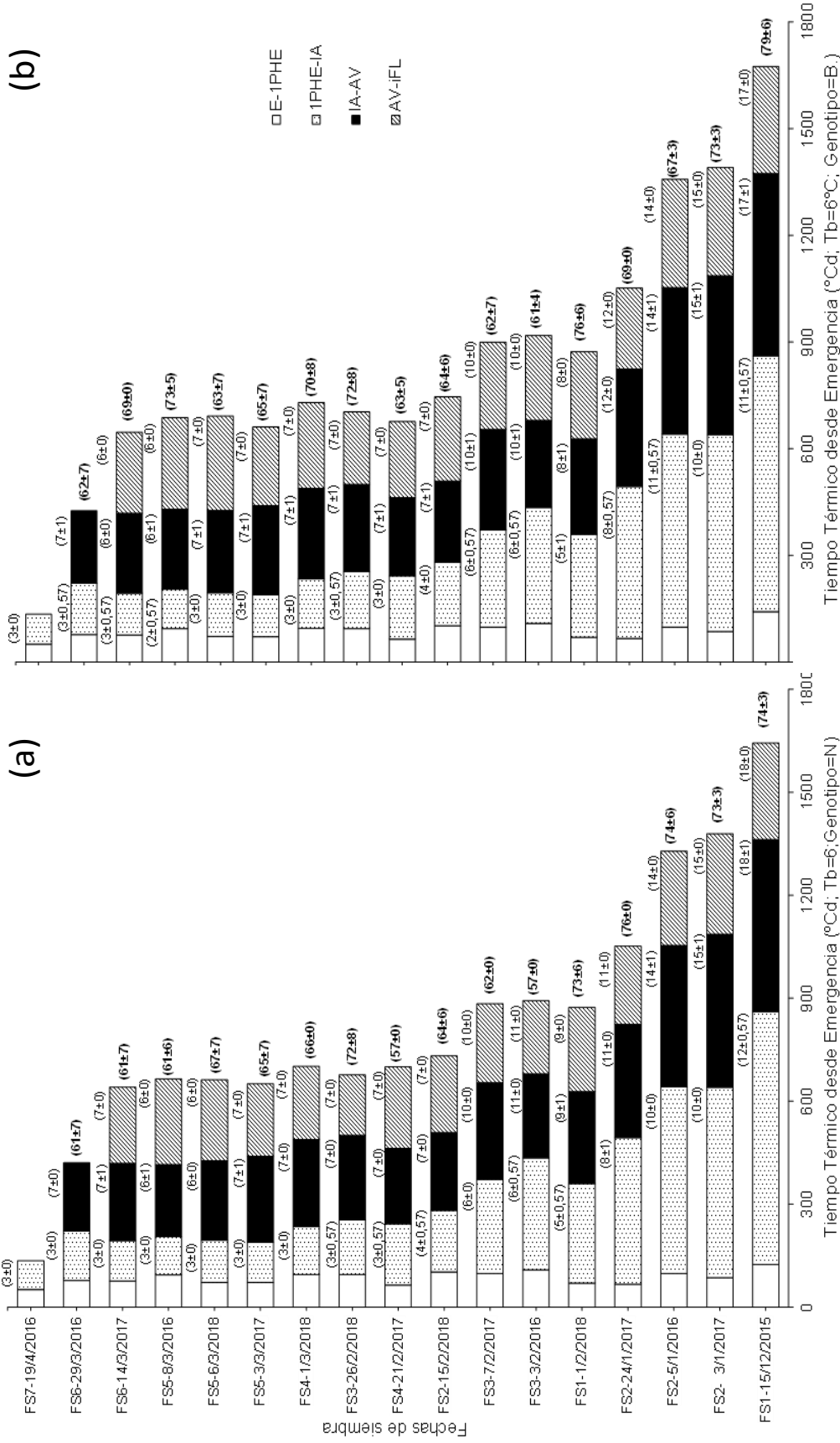


Figura 3.4. Duración ($^{\circ}\text{Cd}$) para las sub-fases de pre-floración en distintos genotipos de chíca en 17 fechas de siembra. (a) población negra; (b) población blanca. Emergencia (E)-primer par de hojas expandidas (1PHE), 1PHE-inducción del ápice (IA), IA-aparición del verticilastro (AV), AV-iniciación de floración (IFL). Los números sobre las barras indican el número de hojas expandidas acumuladas \pm desvío estándar. Los números en negrita a la derecha de las barras indican los valores promedio de filocrono \pm desvío estándar para el período 1PHE-AV ($T_b = 6^{\circ}\text{C}$).

La variación en las condiciones del fotoperíodo modificó el número de hojas expandidas acumuladas en la sub-fase 1PHE–IA. El número de hojas expandidas acumuladas durante 1PHE–IA disminuyó de 13 a 3 para las fechas de siembra del 15 de diciembre de 2015 y el 15 de febrero de 2018, respectivamente. El fotoperíodo no modificó el número de hojas expandidas acumuladas en la sub-fase IA-AV y éste permaneció relativamente constante (rango de 3-5 hojas expandidas) (Figura 3.4). Mientras que durante la sub-fase AV-iFL no hubo nueva aparición de hojas (Figura 3.4). El comportamiento en el número de hojas expandidas fue similar en las dos poblaciones de chíá.

El tiempo térmico necesario para diferenciar dos puntas de hojas (filocrono) es mayor para fechas de siembras tempranas creciendo bajo la influencia de fotoperíodos no óptimos, que para fechas de siembra más tardías creciendo bajo la influencia de fotoperíodos óptimos (rango 76-61 °Cd para FS1 de 2015 y FS6 de 2016, respectivamente) (Figura 3.4). Por ello, el número de hojas expandidas acumuladas se relacionó de manera significativa y positiva con la duración de la sub-fase desde 1PHE hasta IA ($R^2 = 0,97$, $p < 0,01$).

3.3.3 Modelo foto-termal

Ambos genotipos mostraron una respuesta cuantitativa de días cortos a las variaciones de las condiciones del fotoperíodo para la fase 1PHE-iFL (Figura 3.5). Los parámetros ajustados por el modelo bilineal para ambos genotipos fueron similares. En promedio para ambos genotipos, el umbral del fotoperíodo para el inicio de la floración (parámetro c en la Ecuación 3.2) fue de 12,91 horas. Para fotoperíodos menores a 12,91 horas, los genotipos necesitan acumular 603 °Cd para iniciar la floración, mientras que, con fotoperíodos mayores a 12,91 horas, necesitaron 1160 °Cd por hora de retraso en el fotoperíodo para iniciar la floración (parámetro b en la Ecuación 3.2).

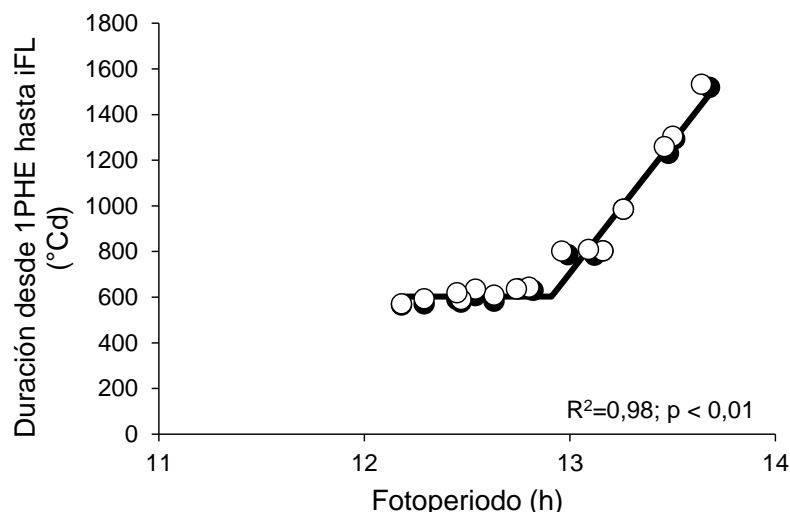


Figura 3.5. Duración (°Cd) para la sub-fase desde el primer par de hojas expandido (1PHE) hasta la iniciación de floración (iFL) en función del fotoperíodo medio de la etapa para los genotipos de chíá blanco (○) y negro (●). La línea continua representa el modelo bilineal ajustado: $TT = -14369 + 1160 * 12,91$ ($P \leq 12,91$); $TT = -14369 + 1160 * P$ ($P > 12,91$) (ver Ecuación 3.2).

Los parámetros del modelo bilineal para las sub-fases 1PHE-IA y IA-AV fueron similares en los dos genotipos, mientras que los genotipos difirieron en los parámetros a y b para la sub-fase AV-iFL, con el valor de c (fotoperíodo umbral) similar para ambos genotipos en esta última sub-fase. En la Tabla 3.2 se puede ver que los fotoperíodos umbrales medios para las sub-fases 1PHE-IA, IA-AV y AV-iFL fueron 13,16; 12,97 y 12,63 horas, respectivamente.

Tabla 3.2. Parámetros del modelo ajustado (propuesto en la Ecuación 3.2) para las sub-fases 1PHE (primer par de hojas expandidas-IA (inducción del ápice), IA-AV (aparición del verticilastro) y AV-iFL (iniciación floral). $R^2 > 0,57$; $p < 0,05$.

Parámetros	1PHE-IA		IA-AV		AV-iFL		
	Blanca	Negra	Blanca	Negra	Blanca	Negra	
A	-6508	a -6444	a -6177	a -6424	a -4229	a -5414	b
B	504	a 499	a 494	a 513	a 353	a 447	b
C	13,17	a 13,16	a 12,97	a 12,98	a 12,62	a 12,64	a

a, b y c son parámetros del modelo bilineal de acuerdo a lo propuesto por en la ecuación 3.1. Las letras a y b muestran diferencias significativas entre genotipos para cada sub-fase mediante el test LSD de Fisher con una $p < 0,05$.

Las sensibilidades medias al fotoperíodo para las sub-fases 1PHE-IA e IA-AV fueron similares ($\sim 502 \text{ °Cd h}^{-1}$), mientras que la sensibilidad al fotoperíodo fue menor para la sub-fase AV-iFL (~ 353 y 447 °Cd h^{-1} para los genotipos blanco y negro, respectivamente).

3.3.4 Duración de las sub-fases, peso seco del verticilastro en floración, radiación interceptada acumulada y rendimiento

Los resultados mostraron que existió una relación positiva y significativa entre PSV_{FL} y la duración de la mayoría de las sub-fases de desarrollo: 1PHE-IA ($R^2 = 0,58$, $p < 0,01$), IA-AV ($R^2 = 0,66$, $p < 0,01$) y AV-iFL ($R^2 = 0,48$, $p < 0,05$). Por el contrario, el PSV_{FL} no se correlacionó significativamente con la duración de la sub-fase E-1PHE (Figura 3.6). Los coeficientes de regresión muestran que las sub-fases 1PHE-IA e IA-AV presentaron pendientes más bajas (0,137 y 0,258, respectivamente) que la sub-fase AV-iFL (0,685) (Figura 3.6 b, c, d).

La relación positiva y significativa entre el rendimiento de grano y el PSV_{FL} ($R^2 = 0,64$, $p < 0,05$) (Figura 3.7) muestra que el rendimiento del grano se asoció a las variaciones en la duración de fases de pre-floración que generaron los cambios en el PSV_{FL} .

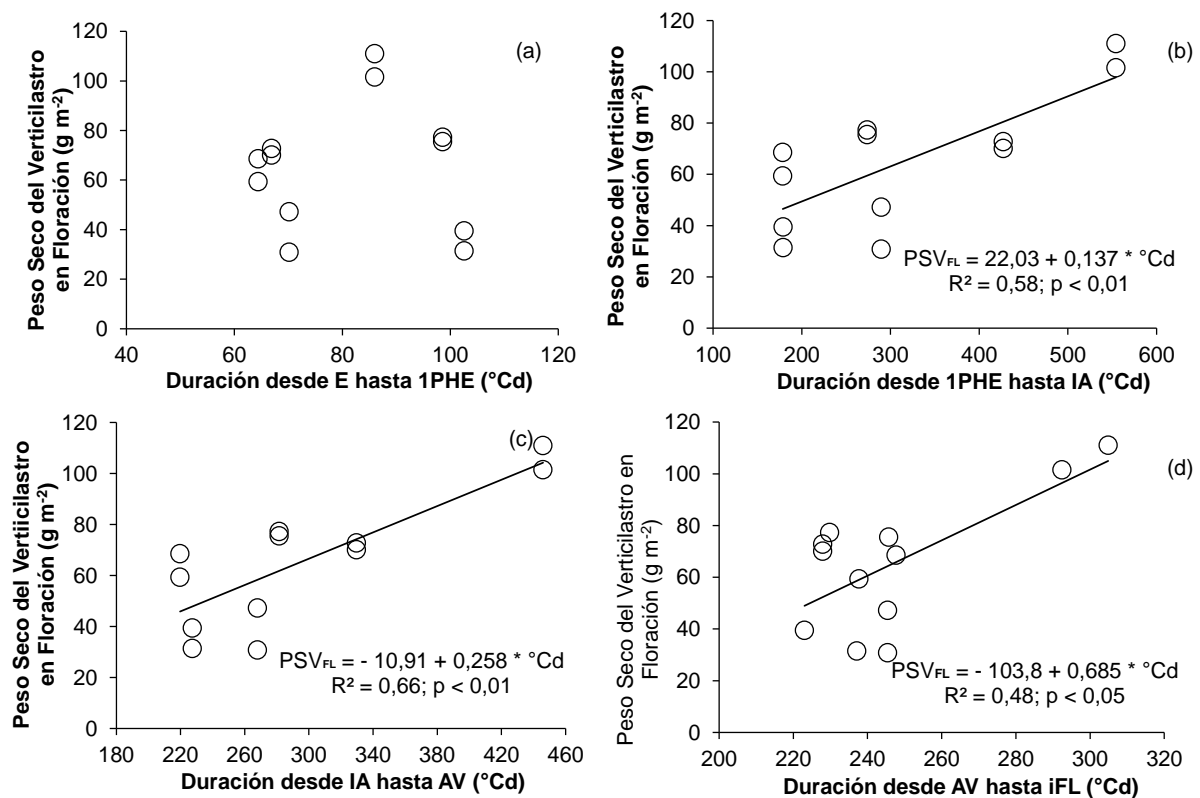


Figura 3.6. Relaciones entre el peso seco del verticilastro en floración (PSV_{FL}) y la duración ($^{\circ}Cd$) de las sub-fases (a) emergencia (E)-primer par de hojas expandidas (1PHE), (b) 1PHE-inducción del ápice (IA), (c) IA-aparición del verticilastro (AV) y (d) AV-inicio de floración (iFL) en chía para los ciclos agrícola 2017 y 2018. Se muestran ecuaciones de regresión lineal ajustadas para cada relación, más el coeficiente de regresión (R^2) y los valores de p.

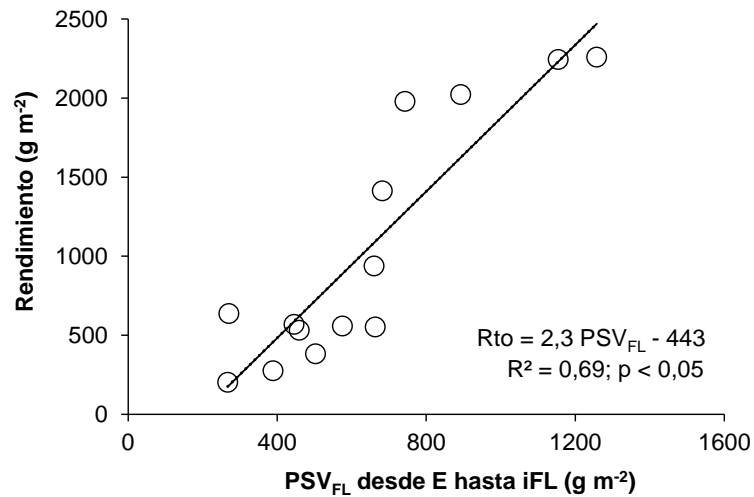


Figura 3.7. Relación entre el rendimiento de grano y el peso seco del verticilastro en floración en chí. Se muestra el coeficiente de regresión (R^2) y el valor p. Debido a episodios de vuelco y alteraciones del crecimiento durante el llenado de grano debido a plagas, enfermedades y/o heladas tempranas durante los ciclos 2017 y 2018, se descartaron algunas fechas de siembra.

Los resultados mostraron que existió una relación positiva y significativa robusta entre RIA y la duración de las sub-fases de desarrollo 1PHE-IA ($R^2 = 0,87$, $p < 0,01$) e IA-AV ($R^2 = 0,94$, $p < 0,01$), mientras que dicha relación fue significativa pero más débil para la sub-fase IA-AV ($R^2 = 0,69$, $p < 0,001$). Por el contrario, la RIA no se correlacionó significativamente con la duración de la sub-fase E-1PHE (Figura 3.8).

La relación significativa entre el rendimiento y RIA ($R^2 = 0,69$, $p < 0,001$) (Figura 3.9) muestra que no es posible separar los efectos de la RIA y la duración de las sub-fases de desarrollo al menos en la etapa E-iFL.

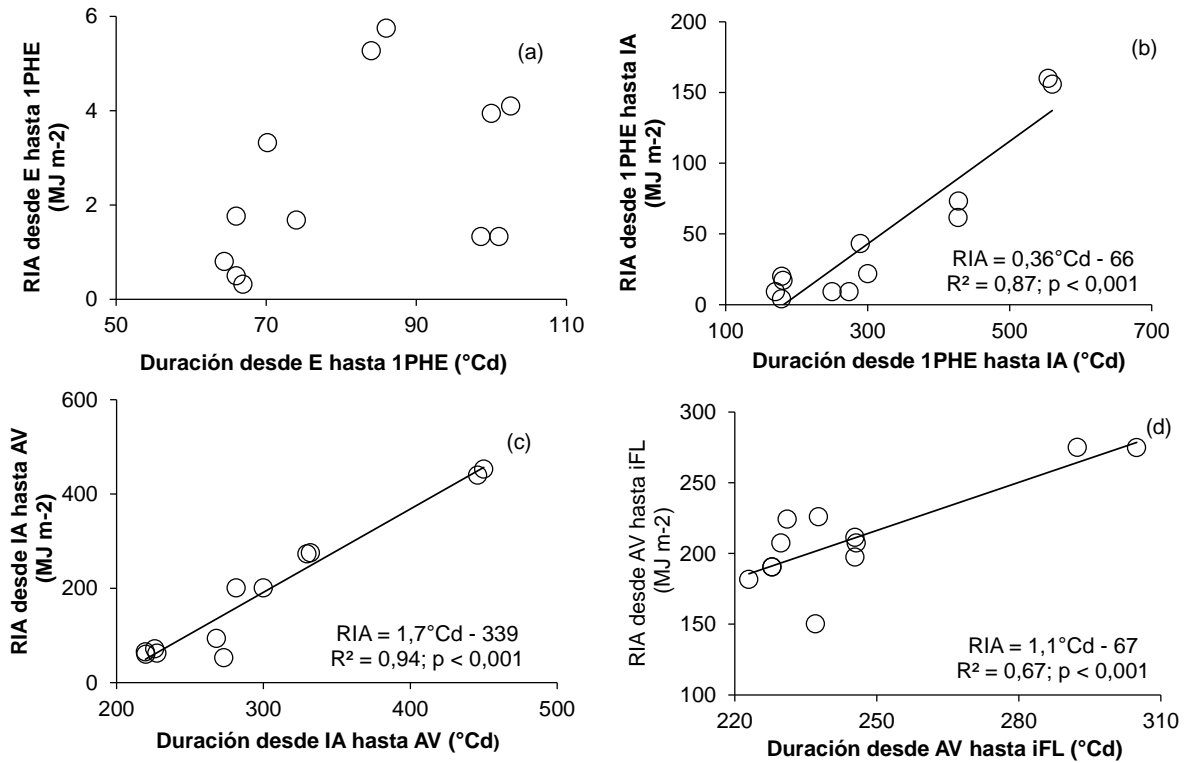


Figura 3.8. Relaciones entre la radiación interceptada acumulada (RIA) (MJ m²) y la duración (°Cd) de las sub-etapas (a) emergencia (E)-primer par de hojas expandidas (1PHE), (b) 1PHE-inducción del ápice (IA), (c) IA-aparición de verticilastos (AV) y (d) AV-inicio de floración (iFL) en chíá. Se muestran ecuaciones de regresión lineal ajustadas para cada relación más el coeficiente de regresión (R^2) y los valores de p.

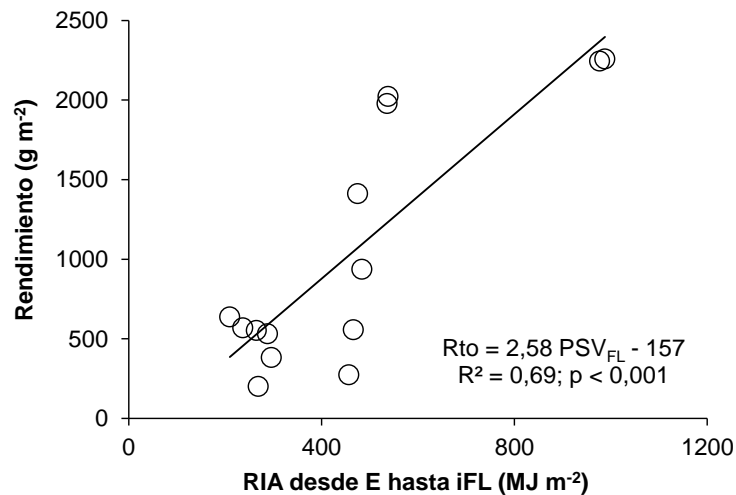


Figura 3.9. Relación entre en rendimiento de grano y la radiación interceptada acumulada (RIA) en la etapa E-iFL en chíá. Se muestra el coeficiente de regresión R^2 y el valor p.

3.4 Discusión

Los resultados encontrados en esta tesis representan una primera aproximación a las temperaturas cardinales de desarrollo reportadas en chía en experimentos llevados a cabo bajo condiciones controladas. El modelo bilineal utilizado fue eficaz para estimar parámetros fisiológicos para predecir el desarrollo de la sub-fase 1PHE-AV del cultivo en estudio. Es posible entonces usar el concepto de Tiempo Térmico (TT) para la predicción del desarrollo fásico de la chía para cualquier valor que asuma la temperatura media del aire entre T_b y T_{op} .

La T_b estimada en esta tesis fue de 6 °C, similar a la reportada para otras especies de la familia Lamiaceae. La albahaca (*Ocimum basicilicum* L.) tiene una T_b entre 5,7 (Mijani et al., 2013; usando modelos bilineales) y 6,11 °C (reportada por Fallahi et al., 2015; usando una aproximación cuadrática), mientras que el orégano (*Origanum vulgare* L.) tiene una T_b de 5,5 °C (Mijani et al., 2013). En lo que respecta a la T_{op} estimada en esta tesis (20,2 °C), la misma es sensiblemente inferior a las reportadas para albahaca y orégano, las cuales se encuentran en el rango 25-30 °C (Ramin et al., 2006; Kumar et al., 2012; Mijani et al., 2013).

Una revisión de la bibliografía actualizada para chía muestra que existe en la literatura un amplio uso de la T_b de 10°C propuesta por Baginsky et al. (2016). En este trabajo, el uso de la T_b parece ser extrapolada de una publicación realizada por Ayerza y Coates (2009), donde se cita para la chía una T_b de 11 °C, una $T_{máx}$ de 36°C y una T_{op} con un rango de entre 16 y 26 °C. La justificación del uso de esas temperaturas cardinales es bastante difusa, no existiendo bases metodológicas ni explicaciones válidas para dicha afirmación. Es bien sabido que, para poder predecir el comportamiento de un cultivo, ya sea a campo o en cámaras de crecimiento, es necesario ajustar modelos capaces de ser validados zonalmente.

Las condiciones foto-termales en las que se realizó este estudio se caracterizaron por una variación importante en el fotoperíodo y poca variación de la temperatura media. Al igual que lo reportado por Jamboonsri et al. (2012) y Baginsky et al. (2016), para esta zona de estudio el desarrollo de las sub-fases de pre-floración de la chía mostraron una respuesta cuantitativa de plantas de días cortos. Los resultados encontrados revelaron un umbral para inicio de floración de 12,91 h, superior a los reportados por Jamboonsri en genotipos de floración temprana (umbral igual a 12 h) en el hemisferio norte, y a los reportados por Baginsky en genotipos domesticados en el hemisferio sur (umbral menor o igual a 11,8 h). Además, los resultados de esta tesis muestran que, para poder superar la fase vegetativa básica y poder inducir a floración, los genotipos de chía necesitan acumular 603 °Cd, superior a los 500 °Cd reportados por Baginsky. Un hallazgo relevante de esta tesis es haber reportado por primera vez la sensibilidad al fotoperíodo para iniciar la floración en chía, la cual requiere 1160 °Cd por hora de retraso en el fotoperíodo.

Otro hallazgo importante y novel es haber determinado la sensibilidad al fotoperíodo en etapas específicas de pre-floración. La sensibilidad al fotoperíodo disminuye con el avance del ciclo del cultivo, siendo menor en la última sub-etapa previa a la floración (AV-iFL).

Los resultados mostraron que la duración de la sub-fase de pre-floración 1PHE-IA se asoció con el número de hojas expandidas acumuladas. En este sentido, se observó que se expandieron una mayor cantidad de hojas a mayor duración de esta sub-etapa. Sin embargo, el número de hojas expandidas acumuladas no se asoció a la duración de la sub-fase post-inductiva IA-AV. Además, el filocrono para el período 1PHE-AV mostró valores similares entre fechas de siembra, lo que podría revelar que el fotoperíodo no afecta este proceso de desarrollo característico de las plantas. Se podría entonces hipotetizar sobre una posible relativa independencia en la regulación del fotoperíodo sobre cada una de ellas. Para poder confirmar esto, se requieren estudios bajo tratamientos de transferencia recíproca entre distintos fotoperíodos en las sub-fases de desarrollo 1PHE-IA, IA-AV y AV-iFL fotoperíodo.

Los resultados mostraron también que el PSV_{FL} se asoció con la duración de las sub-fases de pre-floración 1PHE-IA, IA-AV y AV-iFL. Según los resultados, se logró un PSV_{FL} más alto cuando las sub-fases fueron más largas. A su vez, las etapas con mayores duraciones acumularon mayores RIA, lo que dificulta separar los efectos de la radiación de aquellos provocados por el propio desarrollo del cultivo en la determinación del PSV_{FL} . Estas relaciones positivas también se encontraron para el trigo, la cebada y la colza (Hay y Kirby, 1991; Slafer y Rawson, 1994; Miralles et al., 2001; Pedro et al., 2011). En los casos particulares del trigo y la cebada, incrementos en el número de granos se asociaron principalmente a aumentos del peso de seco de la espiga en antesis (por ejemplo, Fischer y Stockman, 1980; Miralles et al., 2000; Dreccer et al., 2014), siendo el número de granos el principal componente de rendimiento de los cultivos de cereales de invierno (Slafer et al., 2005). Dado que los resultados muestran un mayor rendimiento de grano de chíá asociado a un mayor PSV_{FL} , se podría especular con que los aumentos en PSV_{FL} aumentarían los rendimientos de chíá. Para otros cultivos de granos, los mejoradores han demostrado que los nuevos cultivares superaron a los cultivares más antiguos al tener un mayor número de granos asociados con un mayor peso seco de las espigas en antesis (por ejemplo, Slafer y Andrade, 1993; Miralles et al., 1998; Acreche et al., 2008). Por lo tanto, estos podrían ser caracteres promisorios de selección secundaria y temprana para incrementar el rendimiento de este cultivo.

3.5 Conclusión

Las temperaturas base y óptimas para el desarrollo de la chíá son 6 y 20 °C, respectivamente.

Se caracterizó a la chíá como una planta de respuesta fotoperiódica cuantitativa de días cortos y se logró describir la sensibilidad fotoperiódica y los umbrales fotoperiódicos para todas las

sub-fases previas a floración. Así, el umbral fotoperiódico para el inicio de la floración es de 12,9 horas por encima del cual ocurre un retraso en la floración de 1160 °Cd por hora de retraso en el fotoperíodo. El umbral fotoperiódico para inducción del ápice de vegetativo a reproductivo es de 13,16 horas, más allá del cual el cultivo presenta un retraso de 502 °Cd por hora de atraso en el fotoperíodo. Para la aparición del verticilastro, el umbral fotoperiódico es de 12,97, más allá del cual el cultivo presenta un retraso de 503 °Cd por hora de atraso en el fotoperíodo. Finalmente, para la etapa previa a la floración luego de la aparición de los verticilastros (AV-iFL) presenta un umbral fotoperiódico de 12,63 horas, más allá del cual el cultivo se retrasa en 400 °Cd por hora de atraso en el fotoperíodo.

Se demostró un alargamiento de las sub-fases de pre-floración 1PHE-IA y IA-AV en respuesta a un mayor fotoperíodo. La extensión de la duración de las sub-fases de pre-floración aumenta el rendimiento del grano de la chía a través de los aumentos en PSV_{FL} . Esto es posible porque el PSV_{FL} (i) aumenta con la duración de las sub-fases de pre-floración, y (ii) está relacionado lineal y positivamente con el rendimiento de grano. Los resultados también permiten hipotetizar, aunque no concluir, de que las duraciones de las sub-fases previas a la floración fueron relativamente independientes entre sí en su respuesta al fotoperíodo. Esto podría permitir manipular cada sub-fase de forma independiente sin afectar la fecha de antesis del cultivo.

3.6 Bibliografía

- Acreche, M. M., Briceno-Felix, G., Sánchez, J. A. M., Slafer, G. A., 2008. Physiological bases of genetic gains in Mediterranean bread wheat yield in Spain. *Eur. J. Agron.* 28, 162-170.
- Andrade, F. H., Sadras, V. O., 2002. Bases fisiológicas para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina. Producciones Gráficas Sirio. I.S.B.N.: 987-521-047-1.
- Angus, J. F., Mackenzie, D. H., Morton, R. y Schafer, C. A., 1981. Phasic development in field crops. II. Thermal and photoperiodic responses of spring wheat. *Field Crops Research* 4, 269-283.
- Ayerza, R., 1995. Oil content and fatty acid composition of chia (*Salvia hispanica* L.) from five northwestern locations in Argentina. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 72, 1079 - 1081.
- Ayerza, R., Coates, W., 2011. Protein content, oil content and fatty acid profiles as potential criteria to determine the origin of commercially grown chia (*Salvia hispanica* L.). *Ind. Crop Prod.* 34, 1366-1371.

- Baginsky, C., Arenas, J., Escobar, H., Garrido, M., Valero, N., Tello, D., Pizarro, L., Valenzuela, A., Morales, L., Silva, H., 2016. Growth and yield of chia (*Salvia hispanica* L.) in the Mediterranean and desert climates of Chile. *Chil. J. Agr. Res.* 76, 255-264.
- Bertero, H. D., King, R. W., Hall, A. J., 1999. Photoperiod-sensitive development phases in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *F. Crop Res.* 60, 231-243.
- Bohicchio, R., Rossi, R., Labella, R., Bitella, G., Perinola, M., Amato, M., 2015. Effect of sowing density and nitrogen top-dress fertilization on growth and yield of chia (*Salvia hispanica* L.) in a Mediterranean environment: first results. *Ital. J. Agron.* 10, 163-166.
- Botwright Acuña, T., Richards, R., Partington, D., Merry, A., Christy, B., Zhang, H., O'Leary, G., Riffkin, P., 2019. Extending the duration of the ear construction phase to increase grain yield of bread wheat. *Crop and Pasture* 70, 428-436.
- Busilacchi, H., Bueno, M., Severin, C., Di Sapio, O., Quiroga, M., Flores, V., 2013. Evaluación de *Salvia hispanica* L. cultivada en el sur de Santa Fe (República Argentina). *Cultivos Tropicales*, 34: 55-59.
- Diez, J., Acreche, Anuch Tiranti, J. V., M. M., 2016. Determinación del período crítico para la generación del rendimiento en chíca (*Salvia hispanica* L.), en: Proceedings of the XXXI
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M., Robledo, C.W., 2017. InfoStat versión 2017. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- Dreccer, M.F., Wockner, K. B., Palta, J.A., Lynne McIntyre, C., Borgognone, M.C., Bourgault, M., Reynolds, M., Miralles, D.J., 2014. More fertile florets and grains per spike can be achieved at higher temperature in wheat lines with high spike biomass and sugar content at booting. *Funct. Plant Biol.* 41, 482-495.
- Fischer, R. A., Stockman, Y. M., 1980. Kernel number per spike in wheat (*Triticum aestivum* L.) responses to preanthesis shading. *Aust. J. Plant Physiol.* 7, 169-180.
- Gonzales, F. G., Slafer, G., Miralles, D. J., 2002. Floret development and spike growth as affected by photoperiodic during stem elongation in wheat. *Field Crop Research* 81 (2003) 29-38.
- Hay, R.K.M., Kirby, E.J.M., 1991. Convergence and synchrony-a review of the coordination of development in wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 42, 661-700.
- Ixtaina, V.Y., Nolasco, S.M., Tomás, M.C., 2008. Physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Ind. Crop Prod.* 28, 286-293.

- Jamboonsri, W., Phillips, T.D., Geneve, R.L., Cahill, J.P., Hildebrand, D.F., 2012. Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica* L. - a new ω 3 source. *Gen. Res. Crop Evol.* 59, 171-178.
- Jandell, 1991. Table curve v. 3.0. User's Manual for Version 3.0 AISN Software. Jandell Scientific, Corte Madera, CA.
- Kernich, G.C., Halloran, G.M., Flood, R.G., 1996. Constant and interchanged photoperiod effects on the rate of development in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Aust. J. Plant Physiol.* 23, 489-496.
- Kiniry, J.R., Rosenthal, W.D., Jackson, B.S., Hoogenboom, G., 1991. Predicting leaf development of crop plants, in: Hodges, T. (Editor), *Predicting Crop Phenology*, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 29-42.
- Kumar, B., 2012. Prediction of germination potential in seeds of Indian basil (*Ocimum basilicum* L.). *J. Crop Improv.* 26 (4), 532-539.
- Major, D.J., 1980. Photoperiod response characteristics controlling flowering of nine crop species. *Can. J. Pl Sci.* 60, 777-784.
- Major, D.J., Kiniry, J.R., 1991. Predicting daylength effects on phenological processes, in: Hodges, T. (Ed.), *Predicting Crop Phenology*, CRC. Press, Boca Raton, FL, pp. 16-28.
- Mijani, S., Eskandari Nasrabadi, S., Zarghani, H., Gias Abadi M, 2013. Seed germination and early growth responses of hyssop, sweet basil and oregano to temperature levels. *Notulae Scientia. Biol.* 5 (4), 462-467
- Miralles, D.J., Windauer, L.B., Gómez, N.V., 2004. Factores que regulan el desarrollo de los cultivos de granos, en: Satorre, E. H., Benech Arnold, R.L., Slafer, G. A., de la Fuente, E. B., Miralles, D.J., Otegui, M.E., Savin, R. (Editores), *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Buenos Aires, pp. 59-71.
- Miralles, D.J., Ferro, B.C., Slafer, G.A., 2001. Developmental responses to sowing date in wheat, barley and rapeseed. *F. Crop Res.*, 71, 211-223.
- Miralles, D.J., Richards, R.A., Slafer, G.A., 2000. Duration of the stem elongation period influences the number of fertile florets in wheat and barley. *Aust. J. Plant Physiol.*, 27, 931-940.
- Miralles, D.J., Katz, S.D., Colloca, A., Slafer, G.A., 1998. Floret development in near isogenic wheat lines differing in plant height. *F. Crop Res.*, 59, 21-30.

- Morrison, M. J., P. B. E. Mc Vetty, Shaykewich C. F. , 1989. The determination and verification of a base line temperature for the growth of Westar summer rape. *Can. J. Plant Sci.*, 69, 455-464.
- Naghiloo, S., Khodaverdi, M., Esmailou, Z., Dadpour, M.R., Rudall, P.J., 2014. Comparative floral development in the tribe Mentheae (Nepetoideae: Lamiaceae) and its bearing on the evolution of floral patterns in asterids. *J. Syst. Evol.*, 52, 195-214.
- Pedro, A., Savin, R., Habash D.Z., Slafer, G.A., 2011. Physiological attributes associated with yield and stability in selected lines of a durum wheat population. *Euphytica* 80, 195-208.
- Pérez Brandán, J., Curti, R.N., Acreche, M.M., 2019. Phenological growth stages in chia (*Salvia hispanica* L.) according to the BBCH scale. *Crop & Pasture Science*, 2020, 71, 183–189. <https://doi.org/10.1071/CP19218>
- Pérez Gianmarco, T. I., 2021. Regulación del desarrollo de trigo por genes de sensibilidad al fotoperíodo *Ppd1*. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias.
- Piepho, H.P., Edmondson, R.N., 2018. A tutorial on the statistical analysis of factorial experiments with qualitative and quantitative treatment factor levels. *J. Agron. Crop Sci.* 204, 429-455.
- Ramin, A. A., 2006. Effects of salinity and temperature on germination and seedling establishment of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *J. Herbs Spices Med. Plants*, 11(4), 81–90.
- SAS/STAT Institute Inc, 2015. SAS/SAT 14.1 User's Guide The Mixed Procedure, in: SAS/STAT 14.1 User's Guide. SAS Institute Inc., SAS, Cary, North Carolina, pp. 6048–6234.
- Scalise, J., 2014. Caracterización y diagnóstico de la cadena de valor de la chía en Argentina. Unidad para el Cambio Rural, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina. <https://www.ucar.gob.ar/images/publicaciones/Caractrizaci%C3%B3n%20y%20Diagn%C3%B3stico%20de%20de%20la%20cadena%20de%20valor%20de%20la%20ch%C3%ADa%20en%20en%20Argentina.pdf>.
- Slafer, G.A., Araus, J.L., Royo, C., García del Moral, L.F., 2005. Promising 380 eco-physiological traits for genetic improvement of cereal yields in 381 Mediterranean environments. *Ann Appl. Biol.*, 146, 61-70.

- Slafer, G.A., Rawson, H.M., 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologist and modelers. *Aust. J. Plant Physiol.*, 21, 393-426.
- Slafer, G. A. y Rawson, H. M., 1995. Base and optimum temperatures vary with genotype and stage of development in wheat. *Plant, Cell & Environment*, 18(6), 671-679.
- Slafer, G.A., Andrade, F.H., 1993. Physiological attributes related to the generation of grain-yield in bread wheat cultivars released at different eras. *F. Crop Res.*, 31, 387 351-367.
- Whitechurch, E.M., Slafer, G.A., Miralles, D.J., 2007. Variability in the Duration of Stem Elongation in Wheat Genotypes and Sensitivity to Photoperiod and Vernalization. *J Agron. Crop Sci.*, 193,131-137.

Capítulo 4

Efecto de las condiciones ambientales en la generación del rendimiento y calidad de la chía

(De este capítulo deriva la publicación: Oil and protein concentration and fatty acid composition of chia (*Salvia hispanica* L.) as affected by environmental conditions. Pérez Brandán et al., 2022. Industrial Crops & Products 177: 114496183-189. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114496>).

4.1 Introducción

El rendimiento es la proporción de la biomasa total del cultivo asignada a los órganos cosechables. En el caso de los cereales y otros cultivos de grano, es la biomasa asignada al crecimiento de los granos (Slafer y Savin, 2006). El rendimiento de un cultivo es el atributo en el cual los programas de mejoramiento y las decisiones de manejo normalmente concentran sus esfuerzos. Está fuertemente regulado por factores genéticos, condiciones ambientales y por la interacción entre ambos a lo largo de la estación de crecimiento (Slafer y Savin, 2006). Debido al aumento en la demanda de productos de alta calidad, la mejora de la calidad del producto cosechado pasó a ser también otro de los principales objetivos de las investigaciones agronómicas (Izquierdo y Aguirrezábal, 2015).

Bajo las condiciones ambientales del norte argentino, los productores de chía alcanzan normalmente rendimientos en el rango de 500 a 1200 kg ha⁻¹ (Coates y Ayerza, 1998, 1996), mientras que en parcelas experimentales con riego y condiciones no limitantes se pueden alcanzar hasta 2300 kg ha⁻¹ (Pérez Brandán et al., 2020). Más allá de las implicancias de las distintas escalas de evaluación, esta importante brecha en el rendimiento podría estar relacionada con el conocimiento limitado sobre el comportamiento fisiológico del cultivo que permita el diseño de prácticas de manejo tendientes a maximizar el uso de los recursos y el rendimiento de este cultivo (Bochicchio et al., 2015; Pérez Brandán et al., 2020).

Aunque existen diferencias en los cultivos de granos en cuanto a los atributos morfológicos y fisiológicos determinantes del rendimiento, el estudio de los mismos tradicionalmente se realiza utilizando dos enfoques diferentes pero complementarios (Slafer, 2004). Uno es un modelo mecanístico mediante el análisis de los componentes numéricos del rendimiento, y el otro un modelo biológico, que considera la generación y partición de la biomasa acumulada por el cultivo. Para el caso de la chía, estos dos enfoques se representan en la Figura 4.1.

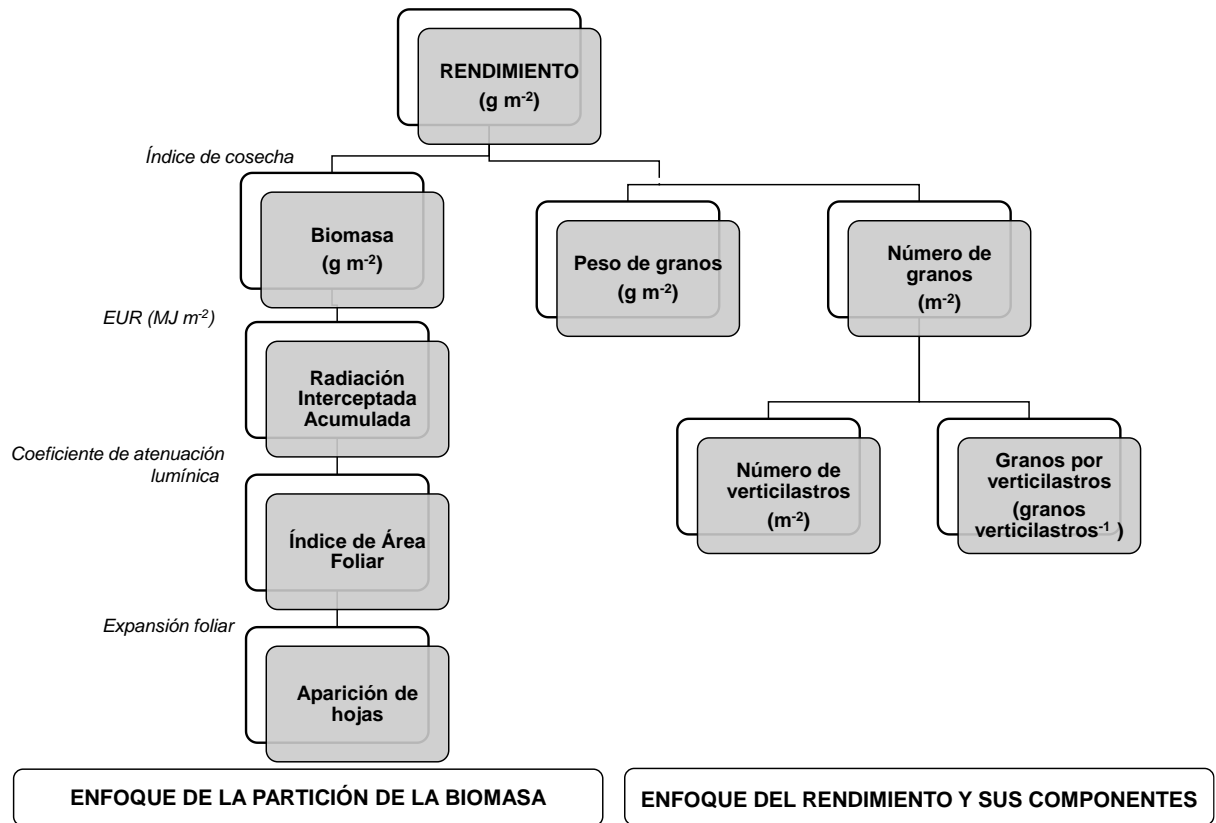


Figura 4.1. Representación de dos enfoques diferentes y complementarios para analizar el rendimiento del grano. El panel derecho en la figura consiste en dividir el rendimiento del grano en componentes numéricos del mismo. El enfoque basado en la partición de la biomasa total (panel izquierdo) está basado en la acumulación de biomasa y cómo ésta es particionada a los diferentes órganos en crecimiento. EUR es la eficiencia en el uso de la radiación. Adaptado de Slafer y Savin (2006).

El enfoque basado en los componentes del rendimiento ha sido el intento fisiológico más popular para comprender la generación del rendimiento de los cultivos a partir de atributos simples. Es matemáticamente correcto y notablemente sólido (Slafer, 2004). A partir de este enfoque se ha determinado que, para distintos ambientes y cultivares, el rendimiento está más asociado al número de granos logrados por unidad de superficie que al peso medio de los mismos (Fischer, 1985; Slafer y Savin, 1991; Slafer et al., 1994; Egli, 1998). A su vez, el número de granos por unidad de superficie se asocia a sub-componentes del mismo que, por ejemplo, para en el caso del trigo, son el número de plantas por unidad de superficie, el número de espigas por planta, el número de espiguillas por espiga y el número de granos por espiguilla (Slafer y Rawson, 1994a). Análogamente al caso del trigo, en chíca, el número de granos por unidad de superficie se asocia al número de plantas por unidad de superficie, el número de verticilastos por planta y el número de granos por verticilastro (Figura 4.1).

El inconveniente de este enfoque es que muchas veces estos componentes y/o sub-componentes del rendimiento están frecuentemente asociados negativamente (Slafer, 1996) debido a mecanismos de retrocontrol (Slafer, 2003). Es decir, existe una superposición en el tiempo en la determinación de los mismos, resultando impredecible el impacto de manipular uno de estos sub-componentes sobre el comportamiento de otro (Fischer, 1984; Slafer, 1996). Aun reconociendo los “ruidos” (desde el punto de vista fisiológico) en la relación entre el rendimiento y el número de granos por unidad de superficie, la aproximación numérica es un gran paso en el entendimiento de la fisiología del rendimiento.

El otro enfoque utilizado se basa en cómo el cultivo acumula la biomasa total y la particiona hacia los distintos órganos de la planta en crecimiento. Ese enfoque es más mecanístico, pero al mismo tiempo más sencillo (Slafer, 2004). La única fuente de energía para el crecimiento de un cultivo es la radiación solar, por lo tanto, la cantidad de crecimiento acumulado depende proporcionalmente de la cantidad de radiación interceptada acumulada (RIA) en un cierto periodo de tiempo. Esta RIA es transformada en biomasa con una cierta eficiencia (que depende de cada cultivo) y se denomina eficiencia de uso de la radiación (EUR) (Sinclair, 1999). Históricamente, en cultivos sometidos a mucha presión de selección como es el caso del trigo, la partición de la biomasa total a granos o índice de cosecha fue el principal rasgo fisiológico que explicó los cambios en el número de granos por unidad de superficie y el rendimiento. Según Austin et al. (1980), el índice de cosecha en trigo presenta un límite teórico del 60%. El uso de este enfoque requiere orientarse en el crecimiento/partición durante la “ventana” del tiempo fenológico denominada “*periodo crítico*” cuando se ha encontrado que el rendimiento del cultivo responde marcadamente a los cambios ambientales. Siguiendo con el ejemplo del trigo, durante esta ventana de tiempo (relativamente estrecha) la espiga compete por los recursos con el tallo, que está alargando sus entrenudos (Fischer, 1985; Kirby, 1988; Savin y Slafer, 1991). Más aún, durante este período, existe una alta correlación entre el peso seco de la espiga en floración y el número de granos por unidad de superficie (Fischer, 1985; Thorne y Wood, 1987; Savin y Slafer, 1991; Slafer y Andrade, 1993). En el caso de la chíá, donde el período crítico para el rendimiento es muy extenso (desde 6 PHE hasta 14 días después del inicio de floración; Diez et al., 2021), la competencia por recursos entre estructuras vegetativas y reproductivas, y entre estructuras reproductivas generadas durante distintos momentos del ciclo, muestra que la reducción en el número de granos por unidad de superficie se asoció a reducciones del número de verticilastros por unidad de superficie y/o al número de granos por verticilastro, dependiendo del momento del ciclo del cultivo (Diez et al., 2021).

En la década del noventa, Shorter (1991) afirmó que la mejora genética futura podría acelerarse si se usaran atributos fisiológicos como criterios de selección. Una de esas

alternativas consistía en optimizar las duraciones relativas de las etapas de pre-floración. Hoy en día es bien conocido que los cambios en los sub-componentes del rendimiento de grano están asociados con la duración de las fases de pre-floración para cultivos como trigo, cebada y colza (Hay y Kirby, 1991; Slafer y Rawson, 1994; Miralles et al., 2001; Pedro et al., 2011) y que, los aumentos en el número de granos en el trigo (Fischer y Stockman, 1980; Dreccer et al., 2014) y la cebada (Miralles et al., 2000) se relacionaron con cambios en estos sub-componentes de pre-floración. Sin embargo, estos atributos que explican procesos claves en el crecimiento y desarrollo de las plantas, aun presentan limitada aplicación en programas de mejoramiento genético.

Como se ha demostrado en el Capítulo 3, en chíá, los cambios en la duración de las sub-etapas de pre-floración generan cambios en la cantidad de RIA en este período, lo que repercute en el PSV_{FL} y el rendimiento del cultivo. Sin embargo, los cambios en los factores ambientales también pueden incidir en la calidad de los granos, siendo la calidad un objetivo importante de numerosas investigaciones agropecuarias. Conceptos fisiológicos que comúnmente son aplicados para el análisis del rendimiento (generación del rendimiento, identificación de períodos críticos, acumulación de biomasa y su partición, etc.) pueden ser usados para investigar y modelar los determinantes genéticos y medioambientales de la concentración y composición de aceite y proteína de los granos (Aguirrezábal, 2009). El girasol y el trigo son usados como modelos para cultivos de oleaginosas y cereales respectivamente (Aguirrezábal, 2009). Por su alto contenido de aceite (cerca al 30%), la chíá se asemejaría más a un cultivo del grupo de las oleaginosas.

Los diferentes cultivos oleaginosos (girasol, maíz, soja o colza, por citar algunos ejemplos) se caracterizan por presentar distinta composición lipídica o ácida (Izquierdo et al., 2009). Diferencias en dicha composición es importante para uso industrial y/o consumo humano. Se desean aceites con alta concentración de ácido oleico debido a su estabilidad (Li et al., 2018) y su impacto positivo en el metabolismo del colesterol, entre otras propiedades (Gunstone, 2000), mientras que los aceites con alto contenido de ácido linoleico y linolénico (ácidos grasos esenciales para el ser humano) ayudan a prevenir enfermedades cardiovasculares (Hao et al., 2021).

Las condiciones ambientales y de crecimiento durante el llenado de granos generan cambios en la cantidad total de aceite sintetizado por grano y en el perfil lipídico de una amplia gama de cultivos (Irving et al., 1988; Andrade y Ferreiro, 1996; Izquierdo et al., 2009, 2017; Schulte et al., 2013). Es aceptado que la temperatura es el factor ambiental que más influye sobre la composición lipídica del aceite. Es así que, un aumento en el porcentaje de ácido oleico al aumentar la temperatura (principalmente temperatura nocturna), fue observado en girasol

(Izquierdo et al., 2002, 2006), colza (Deng y Scarth, 1998) y soja (Rebetzke et al., 1996; Kane et al., 1997).

Por lo general, el efecto de la temperatura sobre la composición lipídica del aceite opera mediante la actividad del complejo enzimático interviniente en dicho proceso (Figura 4.2). En este sentido, el efecto de la temperatura afecta la actividad de la enzima oleico-desaturasa (Garcés y Mancha 1991; Garcés et al., 1992; Kabbaj et al., 1996). Incrementos en temperatura conducen a una menor actividad total de la enzima y, por ende, a incrementos en el porcentaje de ácido oleico a expensas del linoleico. En especies que presentan una concentración significativa de ácido linolénico en su aceite, como la soja y el maíz, el incremento en el porcentaje de ácido oleico se debe a la disminución de los dos ácidos poliinsaturados, linoleico y linolénico (Izquierdo et al., 2009).

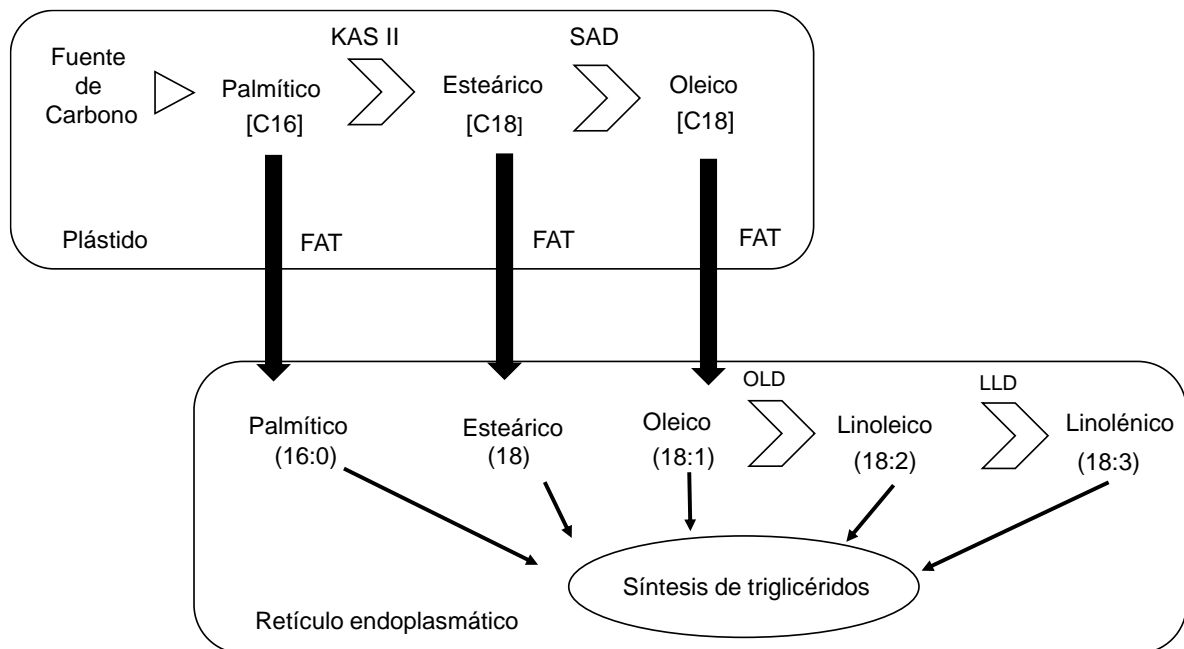


Figura 4.2. Esquema simplificado de la síntesis de ácidos grasos. Las siglas KAS II (3-cetoacil-ACP), SAD ($\Delta 9$ -esteroil PC desaturasa), OLD ($\Delta 12$ -linoleoil PC desaturasa), LLD ($\Delta 15$ -oleil PC desaturasa) representan las enzimas intervinientes en el proceso. Adaptado de Ohlrogge y Jaworski, 1997.

Se han reportado variaciones en la composición lipídica del aceite por efecto de otros factores ambientales, además de la temperatura. La radiación interceptada durante el llenado de granos también altera la producción total de aceite y la composición de ácidos grasos (Harwood, 1994; Williams et al., 1999). Disminuciones en la RIA en girasol redujo la concentración de aceite (Aguirrezábal et al., 2003) y cambió el perfil de ácidos grasos (Izquierdo et al., 2009). En general, incrementos en la temperatura y/o RIA incrementan el

porcentaje de ácido oleico a expensas de los ácidos grasos poliinsaturados (Izquierdo et al., 2009).

Otros factores ambientales que hacen variar la composición lipídica del aceite son la oferta de nitrógeno, la sanidad del cultivo y el fotoperíodo (solo en especies que respondan a este factor ambiental durante el llenado del grano). En general, estos factores producen variaciones en la composición del aceite menores que las que producen la temperatura y la radiación. Sin embargo, conocer sus efectos es de importancia para optimizar el manejo de cultivo con miras a obtener una determinada calidad de aceite.

En chía, el perfil de ácidos grasos también está influenciado por factores ambientales y/o genéticos. Ayerza y Coates (2009) reportaron diferencias significativas entre genotipos en la concentración de los ácidos linoleico (19,2-20,2%) y linolénico (58,4-61,7%). El cultivo de chía en diferentes lugares y años resultó en diferencias en las concentraciones de los ácidos oleico (6,5-9,3%), linoleico (17,0-22,5%) y linolénico (56,9-64,8%), lo que indica que el perfil de ácidos grasos de la chía fue influenciado por las condiciones ambientales (Ayerza, 2009; Ayerza y Coates, 2011). En un experimento bajo condiciones controladas, Cabrera-Santos et al. (2021) informaron que las concentraciones más altas de todos los ácidos grasos, excepto del ácido oleico, se observaron a 20 °C. Sin embargo, no se han realizado experimentos sobre el impacto de las condiciones ambientales durante la el llenando del grano en la composición lipídica de las semillas de chía.

Basados en estos antecedentes, se plantea ver el efecto de variaciones ambientales (generadas mediante el uso de distintas fechas de siembra) en dos poblaciones estabilizadas de chía en (i) la generación de la biomasa total y su partición, (ii) los componentes numéricos del rendimiento, y (iii) la calidad de los granos de chía, con especial énfasis en la concentración y composición lipídica de su aceite.

4.2. Materiales y Métodos

El ensayo se llevó a cabo en el campo experimental de la EEA Salta del INTA durante los ciclos agrícolas 2015/16, 2017 y 2018 para determinar la incidencia de las condiciones ambientales sobre el rendimiento, sus determinantes y la calidad de los granos. Las características generales del ambiente y ubicación del ensayo fueron descriptas en el Capítulo 2, mientras que los tratamientos y diseño experimental utilizados se han detallado en el Capítulo 3.

Si bien el ensayo consistió en seis fechas de siembra para el primer ciclo agrícola (2015-2016), seis fechas de siembra para el segundo ciclo agrícola (2017) y cinco fechas de siembra para el tercer ciclo agrícola (2018), debido a episodios de vuelco durante el llenado del grano

en el primer ciclo y alteraciones del crecimiento durante el llenado de grano debido a plagas, enfermedades y/o heladas tempranas durante los ciclos 2017 y 2018, se descartaron algunas fechas de siembra para el análisis final de este capítulo. Este procedimiento se utilizó para prevenir el ruido ambiental entre ciclos agrícolas generado por dichos factores adversos. En este sentido, todas las fechas de siembras correspondientes al ciclo agrícola 2015-2016 que generaron granos fueron excluidas del análisis porque presentaron vuelco. Las plantas de esas fechas de siembra presentaron excesiva altura que se tradujo en plantas pesadas de sostener para su estructura herbácea. Del ciclo 2017 se descartaron las fechas de siembra correspondientes a marzo (3 de marzo y 14 de marzo) debido a que heladas tempranas de junio afectaron el llenado de grano dando como resultado vaneo de esos granos. Del ciclo 2018 se descartaron las fechas de siembra del 1 de febrero y del 1 de marzo por un ataque fúngico de *Sclerotinia sp* que se presentó a lo largo del lote en forma de manchones de plantas afectadas con presencia de micelios fúngicos algodonosos que afectaron la etapa reproductiva pero no la vegetativa.

Por ello, se seleccionaron las fechas de siembra que no sufrieron las alteraciones mencionadas durante el llenado del grano, asegurando que el espectro de fechas de siembra permita explorar una alta variabilidad de las condiciones ambientales durante dicho período. Para este análisis, quedaron en total siete fechas de siembra correspondientes a los dos últimos ciclos. Las siete fechas de siembra finalmente utilizadas para este capítulo fueron: 3 de enero, 24 de enero, 7 de febrero y 21 de febrero de 2017, y 15 de febrero, 26 de febrero y 6 de marzo de 2018. El ensayo consistió en la combinación de fechas de siembra y genotipos.

4.2.1 Fenología

La fenología fue registrada semanalmente luego de la emergencia para establecer el tiempo en el que el 50% de las plantas de cada sub-parcela alcanzaron determinados estadios fenológicos. La fenología de pre-floración fue reportada en el Capítulo 3. En el caso particular del período comprendido entre el inicio de floración a cosecha, los estadios que se determinaron fueron: inicio de floración (iFL; 60 BBCH), plena floración (FL; 65 BBCH), inicio del llenado de granos (iLLG; 71 BBCH) y madurez fisiológica (MF; 89). Estas determinaciones se realizaron mediante la escala fenológica BBHC propuesta por Pérez Brandán et al. (2019). La duración de etapas fenológicas se expresó en tiempo térmico (°Cd), calculado a partir de la temperatura media diaria menos la temperatura base de 6 °C (Capítulo 3).

4.2.2 Biomasa, partición, rendimiento y sus componentes

En MF se realizó un muestreo de 1 m² de los surcos centrales, sin efectos de borde y cabecera en todas las parcelas para determinar la biomasa seca total y particionada a granos. En todas las muestras tomadas, se determinaron la biomasa seca total (BST; g m⁻²), el número de

verticilastos (NV; m²), el peso seco de verticilastos (PSV; g m⁻²), el rendimiento de grano (R; g m⁻²), el peso de mil granos (PMG; g), el número de granos (NG; m⁻²), el número de granos por verticilastro (NGV; número de granos verticilastro⁻¹) y el índice de cosecha (IC; %). La BST, PSV, R y PMG se obtuvieron secando el material en un estufa de circulación forzada de aire durante 72 hs a 60 °C hasta peso constante.

4.2.3 Radiación interceptada y eficiencia de uso de la radiación

El porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (Ri) se midió en cada sub-parcela semanalmente durante todo el ciclo del cultivo. Para ello se utilizó un ceptómetro digital marca Cavadevices (Cavadevices, Buenos Aires, Argentina) modelo Bar-Rad 50, que detecta el flujo de fotones recibidos en un metro lineal. Se tomaron tres mediciones por sub-parcela al mediodía en días soleados, realizando una medición superior y dos inferiores al canopeo. La medición superior refleja el total de fotones incidentes en un momento dado. Las mediciones inferiores reflejan los fotones no interceptados (fotones transmitidos) por el cultivo. Posteriormente se calculó el porcentaje de la radiación incidente que es interceptada por el cultivo como se muestra en la Ecuación 4.1.

$$Ri (\%) = \frac{\text{Fotones incidentes} - \text{Fotones transmitidos}}{\text{Fotones incidentes}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Se calculó la radiación interceptada acumulada (RIA) entre dos mediciones consecutivas como el producto entre el promedio de intercepción de la radiación de dos mediciones consecutivas y la radiación incidente acumulada entre dichas mediciones. Para obtener la radiación interceptada acumulada entre estadios fenológicos seleccionados, se realizó la sumatoria de las RIA en dichos períodos. La radiación incidente es la sumatoria para un período de la radiación total incidente diaria, datos que provinieron de la estación meteorológica de la EEA del INTA Salta, distante a 500 m del ensayo.

Se calculó la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) desde emergencia (E) a MF mediante la relación entre la biomasa seca total acumulada y la RIA durante el ciclo del cultivo como se muestra en la Ecuación 4.2.

$$EUR (g MJ^{-1}) = \frac{BST (g m^{-2})}{RIA (MJ m^{-2})} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

4.2.4 Calidad de granos

Del material vegetal utilizado para la obtención del rendimiento y sus componentes, se extrajo una sub-muestra para la determinación de la concentración porcentual de proteínas totales,

composición porcentual de aceite y composición lipídica en los granos (ácidos grasos saturados palmítico y esteárico, monoinsaturado oleico y poliinsaturados linoleico $\Omega 6$ y linolénico $\Omega 3$). El porcentaje de proteínas fue determinado sólo para el ciclo 2017 debido a fallas en el equipo de digestión que inutilizaron las muestras del año 2018 (el remanente del material molido para dicho análisis sufrió contaminación fúngica por lo que el mismo se inutilizó). De la cosecha total de granos de ese ciclo de cultivo, una buena parte se envió para el análisis del contenido y composición lipídica, por lo que no quedaron granos remanentes que alcancen para realizar una nueva determinación del contenido de proteínas.

4.2.4.1 Determinación del contenido de proteínas

La determinación del contenido de proteínas en granos se realizó mediante el método de Kjeldahl (Nelson y Sommers, 1973). Este método consta de diferentes pasos de ejecución:

Primer paso: Digestión. En esta etapa se permitió la conversión del nitrógeno en ion amonio (NH_4^+). La muestra se colocó en un balón de Kjeldahl de 500 mL junto con un gramo de mezcla catalizadora (10 g de K_2SO_4 , 1 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), perlas de vidrio y 25 mL de H_2SO_4 concentrado. Se calentó en un digestor múltiple para micro-digestión a 350 °C hasta el cese del desprendimiento de espuma, y posteriormente se continuó realizando el calentamiento enérgicamente hasta completar la digestión de la materia orgánica (aproximadamente una hora). Se retiró y se dejó enfriar. Se preparó en forma paralela un blanco.

Segundo paso: Destilación. Esta etapa permitió la separación del amoníaco (NH_3) por una destilación con arrastre con vapor y posterior solubilización en una solución ácida de concentración conocida. Luego del enfriamiento del balón salido de la digestión, se realizó una dilución con 200 mL de agua destilada y se añadió una solución de NaOH 40% con el propósito de alcalinizar la solución y así liberar el ion amonio presente, convirtiéndolo en NH_3 . Se agregaron bolitas de zinc como catalizador de la reacción y luego el balón se conectó al equipo destilador y el NH_3 fue recogido en una solución ácida de concentración conocida. Previamente, se colocó debajo de cada salida de destilación un Erlenmeyer de 125 mL con 10 mL de H_3BO_3 al 4% para recibir la solución que se fue destilando y contenía el ion amonio. Lentamente la solución fue virando de un color celeste a uno verdoso. Se recibieron aproximadamente 100 mL de solución.

Tercer paso: Titulación. Esta etapa permitió la medición de la cantidad de ácido neutralizado por el NH_3 disuelto, lo cual indica la cantidad de nitrógeno presente en la muestra inicial. Para ello, el contenido del Erlenmeyer del paso anterior se tituló con H_2SO_4 0,02 N estandarizado hasta neutralizar el contenido del mismo, momento que ocurre a partir de la aparición del color violeta. Se anotó la lectura correspondiente del gasto de ácido realizado. Finalmente, el valor

correspondiente a la lectura realizada se llevó a la fórmula de la Ecuación 4.3 y se calculó el porcentaje de Nitrógeno total (previa resta de la lectura del blanco).

$$N_{\text{total}} (\%) = \frac{\text{Gasto ácido (a-b)} * N \text{ ácido sulfúrico} * F.C.}{\text{Peso de la muestra (g)}} * \frac{100}{\% \text{ BST}} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

Donde;

N total (%) = Nitrógeno total,

a = gasto de ácido sulfúrico en titulación de la muestra,

b = gasto de ácido sulfúrico en titulación del blanco,

N = normalidad del ácido sulfúrico,

F.C. = factor de corrección del ácido sulfúrico de titulación (1,4007),

BST (%) = porcentaje de biomasa seca realizado a 105 °C, para referir el resultado final a “base seca total”.

Finalmente, el porcentaje de nitrógeno cuantificado se convierte a contenido de proteínas por medio del factor de corrección 6,25.

4.2.4.2 Determinación del contenido de aceite y la concentración de ácidos grasos

Las determinaciones de la concentración de ácidos grasos totales y la composición lipídica fueron llevadas a cabo en el Laboratorio de Calidad de Granos y Aceites de la Unidad Integrada Balcarce (INTA-FCA, UNMDP). La extracción del aceite se realizó siguiendo la técnica propuesta por Soxhlet usando n-hexano como solvente (American Oil Chemistry Society, 1997). Los ácidos grasos presentes en el aceite fueron metilados siguiendo la técnica propuesta por Sukhija y Palmquist (1988) y la concentración de ácidos grasos fue expresada como un porcentaje del total de ácidos grasos identificados en el aceite. Los ácidos grasos metilados se separaron usando un equipo Shimadzu GC-2014 (Kyoto, Japón) provisto de una columna capilar (30 m de longitud, 0,25 mm i.d., 0,20 mm de espesor de película: DB-23). El gas portador fue nitrógeno y las temperaturas del inyector, horno y detector fueron de 250, 210 y 275 °C, respectivamente.

4.2.5 Análisis estadísticos

Dado que el análisis del modelo compuesto que consideraba a los ciclos agrícolas como fuente de variación (la combinación de genotipos y fechas de siembra se encontraban

anidadas dentro de los ciclos agrícolas) mostró que los ciclos agrícolas no contribuían significativamente a la variabilidad de la interacción entre fechas de siembra (FS) y genotipos (G), se pudo descartar su efecto y utilizar un modelo simplificado que integró todos los datos sin considerar los ciclos agrícolas. Se utilizó un análisis combinado de varianza (ANOVA) para evaluar los efectos del genotipo (G), la fecha de siembra (FS) y su interacción (G * FS) sobre el rendimiento (componentes numéricos y biomasa y su partición) y la calidad (porcentaje de aceite, proteínas y composición lipídica). Los componentes de la varianza se calcularon utilizando la suma de cuadrados del Tipo III porque se perdieron algunos bloques o fechas de siembra entre las campañas agrícolas. El análisis se calculó en InfoStat versión 2017 (Di Rienzo et al., 2017).

Para caracterizar la respuesta del porcentaje de aceite y ácido oleico de los granos durante el período de llenado en chíá en función de la radiación fotosintéticamente activa (RIA), se utilizó el enfoque general de Dosio et al. (2000) e Izquierdo et al. (2008). Se ajustó un modelo bilineal para la relación entre los porcentajes de aceite y oleico en función de la RIA para todas fechas de siembras y unidades experimentales, como se observa en la Ecuación 4.4:

$$y (\%) = a + b \cdot \text{RIA}; \text{ si } \text{RIA} \leq c$$

$$y (\%) = a + b \cdot c; \text{ si } \text{RIA} > c$$

(Ecuación 4.4)

Donde,

Y (%) = valor de cada variable analizada (aceite, u oleico),

a = la intersección de la regresión lineal,

b = la pendiente de la regresión lineal,

c = el valor de RIA donde ocurre la inflexión de la recta.

El término $a + b \cdot c$ representa la fase de no respuesta a variaciones de la radiación solar al cambiar la RIA. El modelo bilineal se ajustó utilizando el software QtiPlot 5.12.2 (Vasilief et al., 2019).

Se realizaron análisis de regresión lineal y correlación para determinar la importancia y la magnitud de las relaciones entre rendimiento de grano y sus componentes, entre rendimiento y biomasa particionada, y entre los porcentajes de aceite, ácidos grasos y proteínas y las condiciones ambientales (principalmente temperatura y radiación). Estos análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete InfoStat versión 2017 (Di Rienzo et al., 2017).

4.3 Resultados

4.3.1 Condiciones ambientales durante el período de llenado

Las condiciones ambientales para los ciclos agrícolas 2017 y 2018 se muestran en la Figura 4.3. La dinámica de las temperaturas y la radiación incidente entre abril y principios de agosto fue similar entre los ciclos agrícolas, destacándose para ambos ciclos agrícolas una marcada disminución de la temperatura mínima a partir de principios de mayo. Para éstos meses, el fotoperíodo varió entre 12,4 a 10,9 h.

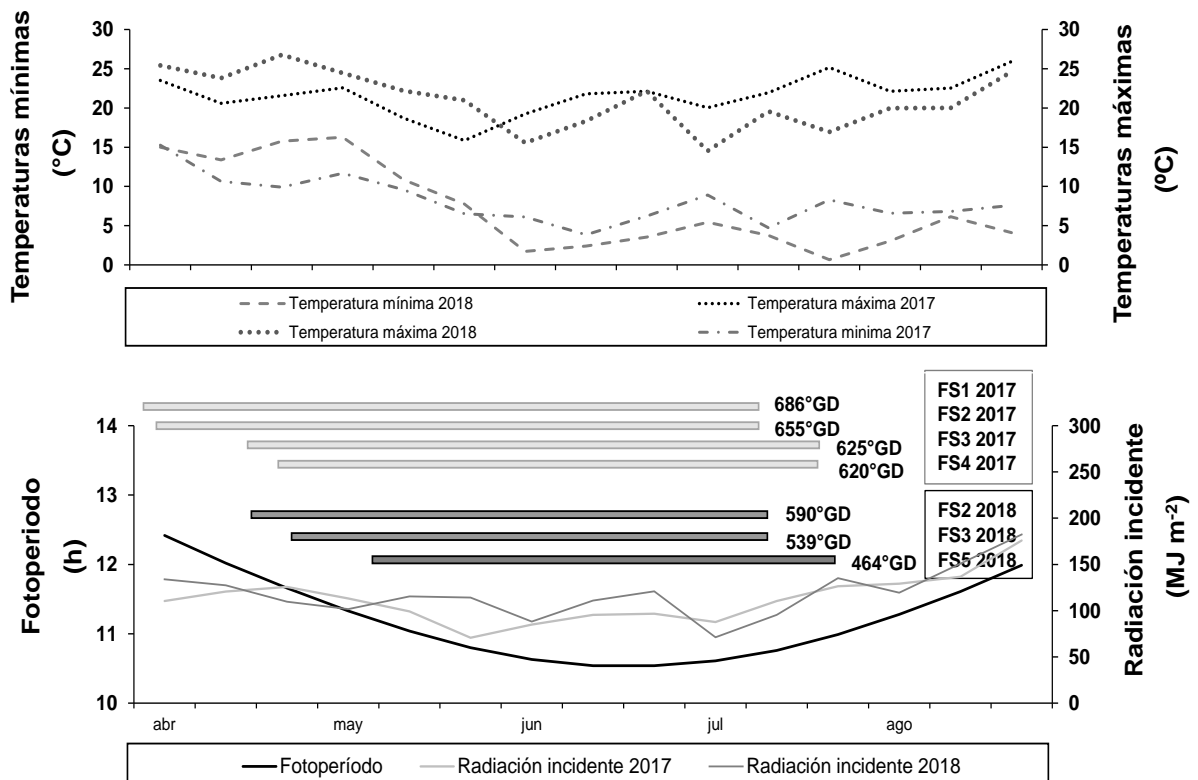


Figura 4.3. Temperaturas máximas y mínimas (líneas discontinuas), fotoperíodo y radiación incidente (líneas continuas) para los experimentos de fecha de siembra durante el período de llenado de grano para los ciclos agrícolas 2017 y 2018. Las barras representan la duración (en días calendario) de la fase de desarrollo desde el inicio de la floración a madurez fisiológica de diferentes fechas de siembra (FS) en chíá.

Los tratamientos de fechas de siembra modificaron la duración del período de llenado de granos. El tiempo térmico desde inicio de floración hasta la madurez fisiológica disminuyó de 686 a 464° Cd con el atraso en la fecha de siembra (Tabla 4.6). Debido a que la temperatura media (principalmente debido a menores temperaturas mínimas) y el fotoperíodo durante el período de llenado tuvieron una tendencia a disminuir con el atraso de la fecha de siembra

(Figura 4.3), la disminución en la duración de este período se podría deber a que la chíá también responde marcadamente al fotoperíodo en post-floración del cultivo.

4.3.2 Rendimiento y sus componentes

El ANOVA reveló efectos significativos de la fecha de siembra en el peso de mil granos (PMG), el número de granos (NG), el número de granos por verticilastro (NGV), el número de verticilastos (NV), el peso seco de los verticilastos a cosecha (PSV), el rendimiento (R) y la relación entre NG y PSV (NG/PSV). Además, reveló efectos significativos del genotipo sobre el PMG, el NG, el NGV y el NG/PSV. No se observó efecto significativo de la interacción entre fecha de siembra y genotipo sobre ninguna variable (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Cuadrados medios para fecha de siembra, genotipos y su interacción para peso de mil granos (PMG), número de granos (NG), número de granos por verticilastro (NGV), número de verticilastos (NV), peso seco de verticilastos (PSV), rendimiento (R) y NG/PSV en el cultivo de chíá.

Fuente de variación	PMG (mg)	NG (m ⁻²)	NGV (granos vert. ¹)	NV (m ⁻²)	PSV (g m ⁻²)	R (g m ⁻²)	NG/PSV (granos g ⁻¹)
Fecha de Siembra (FS)	78068***	24265701328***	28786***	189977***	67094***	40693***	64624***
Genotipo (G)	85585***	5338186915**	13254**	609	7	2196	61239***
FS*G	664	918791458	932	14727	6423	1260	1479
Bloque (B)	2389	549236575	763	5035	1948	776	882

* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$.

El atraso en la fecha de siembra desde los primeros días de enero hacia mediados de febrero no generó diferencias significativas en el rendimiento entre éstas fechas de siembra, presentando los mayores rendimientos de chíá. Por el contrario, fechas de siembra posteriores, disminuyeron significativamente su rendimiento a medida que más se atrasaba la fecha de siembra (Figura 4.4 d). El rango de variación de rendimientos medios debido a las diferentes fechas de siembra fue de 30 a 234 g m⁻². De manera similar, el número de granos disminuyó a partir de fechas de siembras posteriores a mediados de febrero (Figura 4.4 b). Fechas de siembra tardías generaron ciclos del cultivo más cortos con condiciones ambientales menos favorables para el llenado de grano. Tendencias similares, algunas no tan marcadas, se encontraron para el peso de mil granos, el número de granos por verticilastro, el número de verticilastos, el peso seco de verticilastos a cosecha y el número de granos por unidad de peso seco de verticilastos a cosecha (Figura 4.4 a, c, e, f, g).

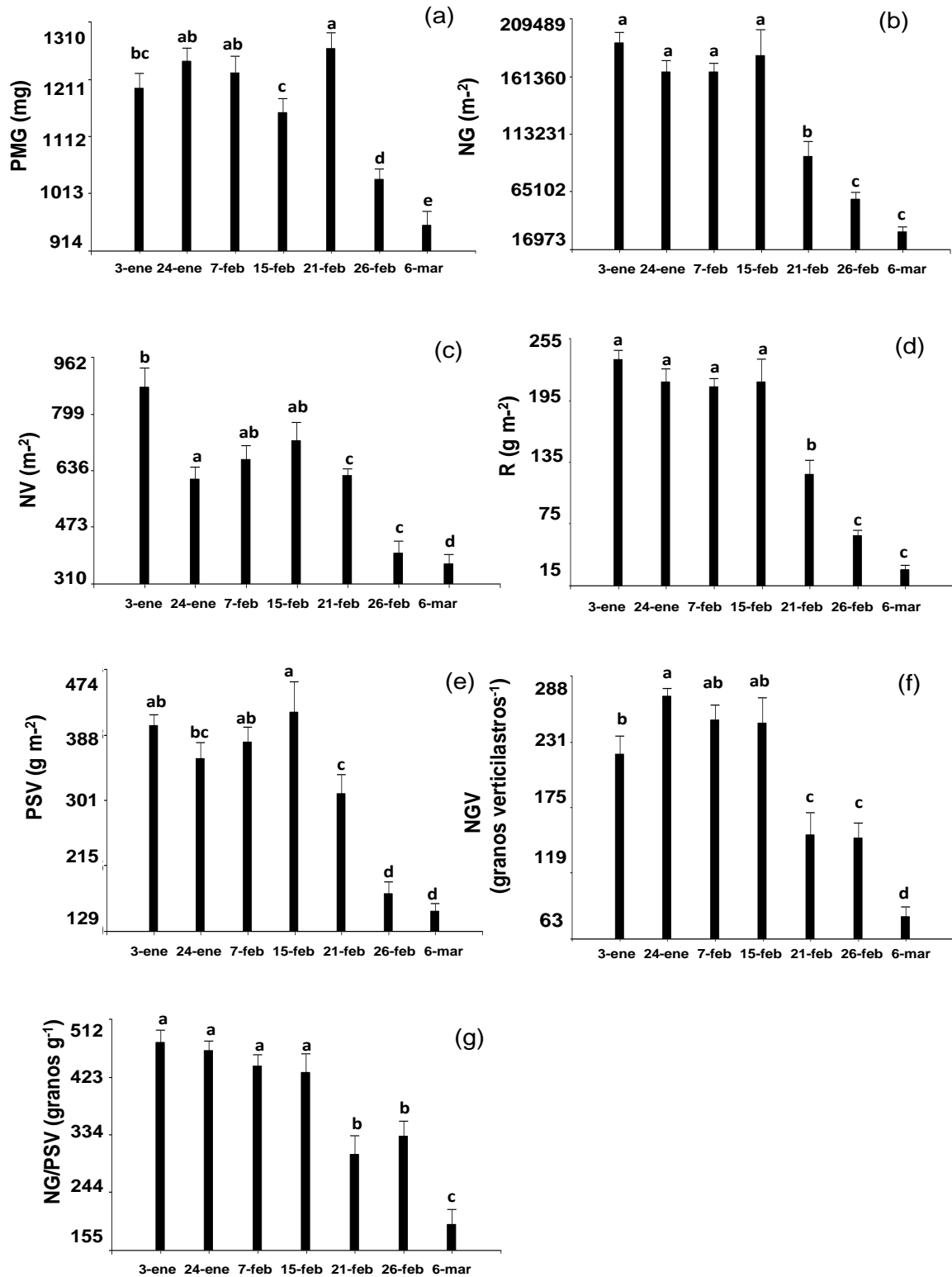


Figura 4.4. Efecto de las distintas fechas de siembra sobre el peso de mil granos (PMG; a), el número de granos (NG; b), el número de verticilastos (NV, c), el rendimiento (R; d), el peso medio de verticilastos a cosecha (PSV; e), el número de granos por verticilastro (NGV; f) y el número de granos por unidad de peso seco de verticilastro a cosecha (NGV/PSV; g) en chíca

para los ciclos agrícolas 2017 y 2018. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre fechas de siembra mediante el test LSD de Fisher con una $p < 0,05$. Las barras representan el error estándar.

El genotipo negro tendió a presentar marginalmente mayor número de granos (Figura 4.5 b), número de granos por verticilastro (Figura 4.5 c) y número de granos por unidad de peso seco de verticilastro a cosecha (NG/PSV; (Figura 4.5 d), mientras que el genotipo blanco presentó mayor peso de mil granos (Figura 4.5 a). Dado que los genotipos no se diferenciaron para el número de verticilastos y el peso seco de verticilastro, los resultados podrían estar mostrando que el genotipo negro presenta mayor eficiencia en la partición de los recursos asignados a las estructuras reproductivas (verticilastos), priorizando los recursos asignados a granos que a otras estructuras del verticilastro (brácteas, carpelos, loculos y lóbulos) respecto del genotipo blanco. Dicho de otra manera, la partición a granos a nivel del verticilastro fue mayor en el genotipo negro (Figura 4.5 d).

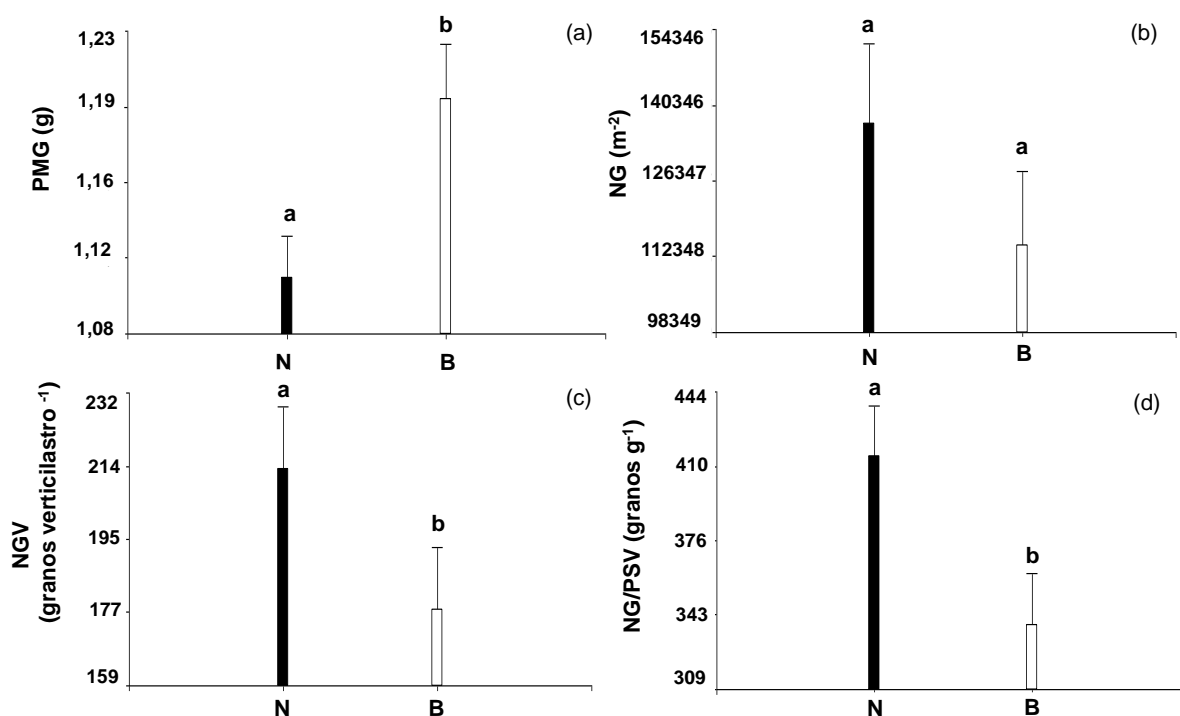


Figura 4.5. Efecto del genotipo sobre el peso de mil granos (PMG; a), el número de granos (NG; b), el número de granos por verticilastro (NGV; c) y el número de granos por unidad de peso seco de verticilastro (NG/PSV; d) en chíca para los ciclos agrícolas 2017 y 2018. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre genotipos mediante el test LSD de Fisher con una $p < 0,05$. Las barras representan el error estándar.

El rendimiento se asoció positivamente y de manera robusta con el número de granos ($R^2 = 0,98$; $p < 0,001$), mientras que su asociación con el peso de mil granos fue positiva pero más

débil ($R^2 = 0,33$; $p < 0,001$) (Figura 4.6 a, b). A su vez, el número de granos se asoció positivamente con el número de verticilastos ($R^2 = 0,68$; $p < 0,001$) y con el número de granos por verticilastro ($R^2 = 0,77$; $p < 0,001$) (Figura 4.6).

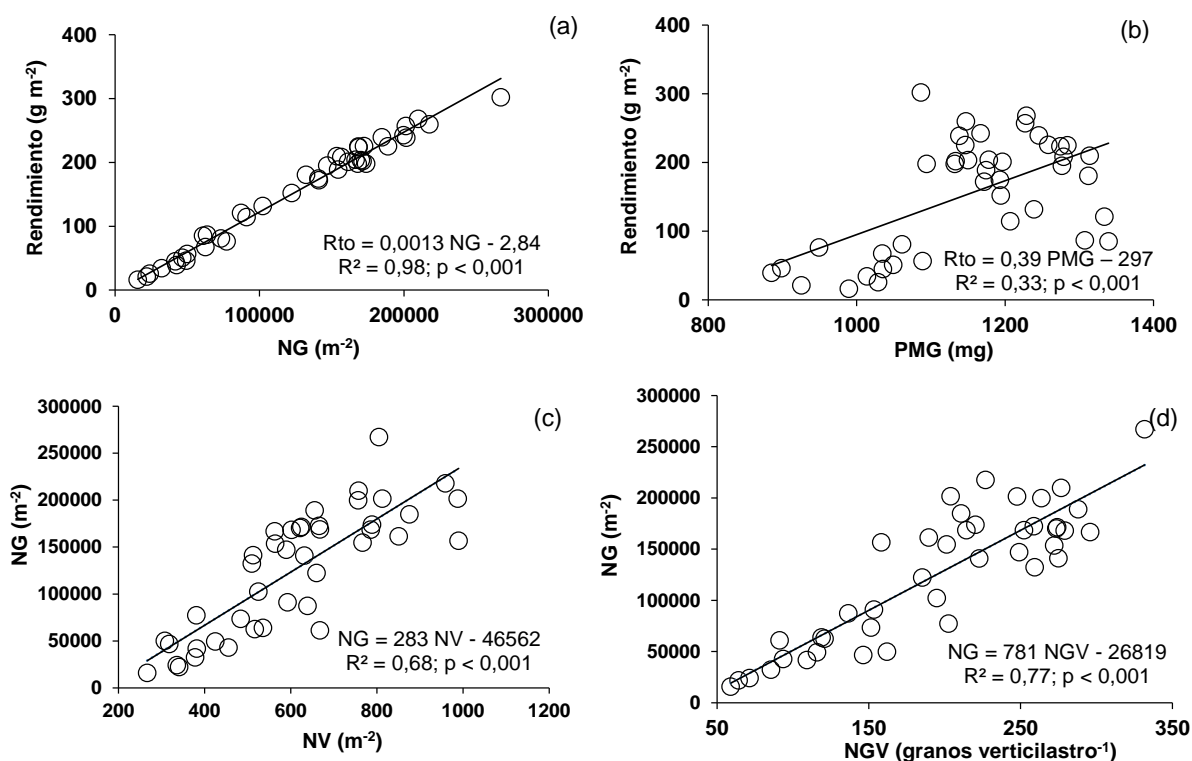


Figura 4.6. Relaciones entre el rendimiento y el número de granos (NG; a) y peso de mil granos (PMG; b), y entre el NG y el número de verticilastos (NV; c) y el número de granos por verticilastro (NGV; d) en chíca para los ciclos agrícolas 2017 y 2018. Se muestran ecuaciones de regresión lineal ajustadas para cada relación con su correspondiente coeficiente de regresión (R^2) y valores p.

4.3.3 Generación de la biomasa seca total y partición

El ANOVA reveló efectos significativos de las fechas de siembra sobre la biomasa seca total (BST), el índice de cosecha (IC), la radiación interceptada acumulada (RIA) y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). También existieron diferencias significativas entre genotipos para el IC. No se encontraron efectos significativos relacionados a la interacción entre fecha de siembra y genotipos (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Cuadrados medios para fecha de siembra, genotipo, y su interacción para biomasa seca total (BST), índice de cosecha (IC), radiación interceptada acumulada (RIA) y eficiencia de uso de la radiación (EUR).

Fuente de Variación	BST (g m ⁻²)	IC (%)	RIA (MJ m ⁻²)	EUR (g MJ ⁻¹)
Fecha de Siembra (FS)	1122544***	147***	1141883***	0,19***
Genotipo (G)	15406	78**	289	0,02
FS*G	21721	5	9155	0,01
Bloque (B)	14340	5	998	1,00

* p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001.

En general, hubo una tendencia a disminuir la biomasa seca total generada a medida que se atrasó la fecha de siembra. Fechas de siembra tempranas con ciclos largos acumularon mayor cantidad de biomasa seca total que fechas de siembra tardías con un ciclo de crecimiento más corto (Tabla 4.3). Este comportamiento, similar al del rendimiento, resultó en una asociación positiva entre el rendimiento y la biomasa seca total ($R^2 = 0,76$; $p < 0,001$) (Figura 4.7a). Las diferencias en los patrones de acumulación de la biomasa seca total pueden explicarse por las diferencias en la radiación interceptada acumulada y en la eficiencia de uso de la radiación entre fechas de siembra. En los ciclos más largos, las plantas pasan más tiempo creciendo en el campo, por lo que interceptan mayor cantidad de radiación incidente. A su vez, en estos ciclos las plantas utilizan de manera más eficiente la radiación posiblemente debido a un mejor balance entre estructuras vegetativas y reproductivas, y a que, en fechas de siembras tardías, el llenado del grano se produce cuando la radiación que incide diariamente sobre el cultivo y las temperaturas decaen progresivamente (Tabla 4.3; Figura 4.3). Estas tendencias generaron asociaciones positivas entre la biomasa seca total con la radiación interceptada acumulada ($R^2 = 0,82$; $p < 0,001$) y con la eficiencia de uso de la radiación ($R^2 = 0,29$ $p < 0,001$) (Figura 4.7 c, d).

Tabla 4.3. Comparación de medias para la biomasa seca total (BST), índice de cosecha (IC), radiación interceptada acumulada (RIA), eficiencia de uso de la radiación (EUR).

			BST (g m ⁻²)	IC (%)	RIA (MJ m ⁻² ciclo)	EUR (g MJ ⁻¹)				
Fecha de siembra										
2017	3-ene	FS1	1597	a	15	d	1681	a	0,95	b
2017	24-ene	FS2	1119	b	19	bc	1302	b	0,86	b
2017	7-feb	FS3	1027	b	20	b	1221	c	0,84	bc
2018	15-feb	FS2	862	c	24	a	740	d	1,16	a
2017	21-feb	FS4	770	c	16	cd	1188	c	0,65	d
2018	26-feb	FS3	384	d	17	cd	545	e	0,71	cd
2018	6-mar	FS5	359	d	9	e	516	e	0,70	cd
Genotipo										
Blanco (B)			893	a	16	b	1025	a	0,86	a
Negro (N)			855	a	18	a	1030	a	0,82	a

Letras diferentes muestran diferencias significativas entre fechas de siembra y /o genotipos mediante test de LDS de Fisher con una $p < 0,005$.

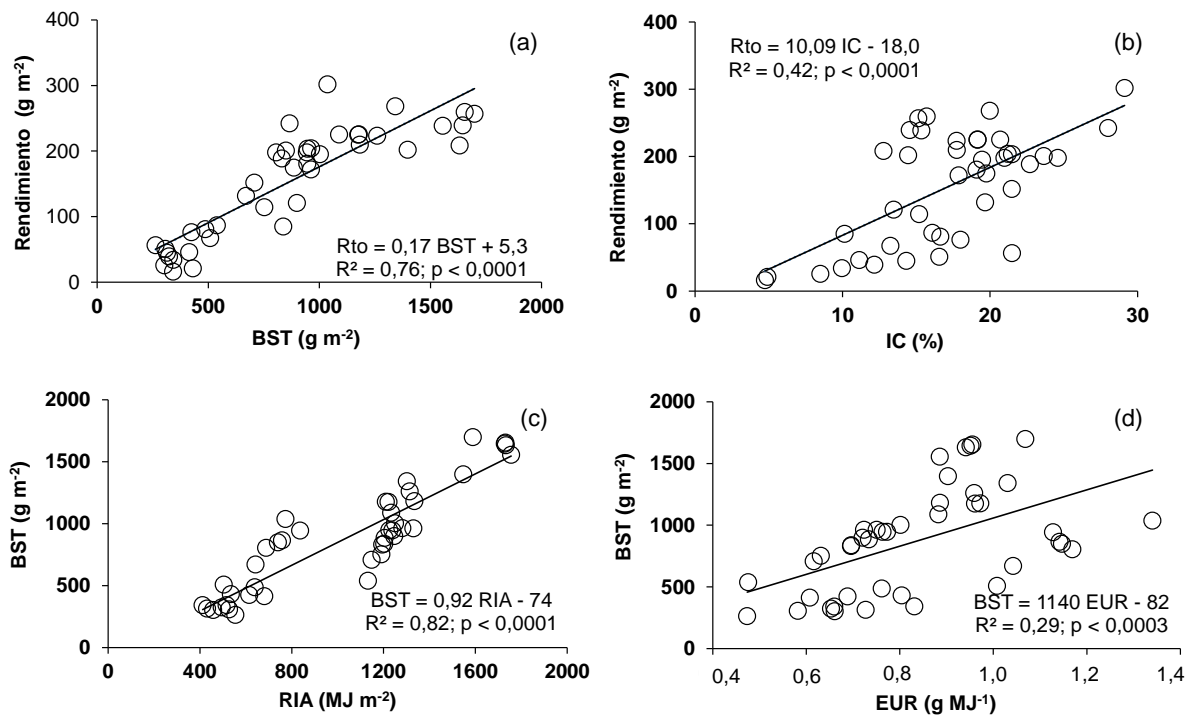


Figura 4.7. Relaciones entre el rendimiento y biomasa seca total (BST; a), índice de cosecha (IC; b) y entre BST y radiación acumulada interceptada (RIA; c), eficiencia de uso de la radiación (EUR, d) en chíá para los ciclos agrícolas 2017 y 2018. Se muestran ecuaciones de regresión lineal ajustadas para cada relación con su correspondiente coeficiente de regresión (R^2) y valores p .

No existió una tendencia clara de cambio en el índice de cosecha con cambios en la fecha de siembra. En este sentido, se observó que las mayores particiones de biomasa se observaron en fechas de siembra abarcadas entre fines de enero y mediados de febrero, donde posiblemente el cultivo logre un mejor balance entre estructuras vegetativas y reproductivas (Tabla 4.3). Sin embargo, el rendimiento si se asoció positivamente con el IC ($R^2 = 0,42$; $p < 0,001$) (Figura 4.7 b).

Las diferencias significativas entre genotipos para el índice de cosecha mostraron que el genotipo negro destinó mayor proporción de la biomasa seca total a granos que el genotipo blanco (Tabla 4.3), lo cual se podría asociar a su mayor partición a nivel de verticilastos (NG/PSV; Figura 4.5 d).

4.3.4 Componentes de calidad del grano

El ANOVA reveló efectos significativos de la fecha de siembra sobre los contenidos de aceite y proteínas, la composición lipídica del aceite (porcentajes de palmítico, esteárico, oleico, linoleico $\Omega 6$ y linolénico $\Omega 3$), la relación $\Omega 6:\Omega 3$, la sumatoria de ácidos grasos saturados (ΣAGS), la sumatoria de ácidos grasos poliinsaturados ($\Sigma AGPI$) y la relación de ácidos grasos poliinsaturados respecto a saturados (AGPI:AGS). También reveló efectos significativos del genotipo sobre el porcentaje de palmítico, linoleico $\Omega 6$, linolénico $\Omega 3$, relación $\Omega 6:\Omega 3$, ΣAGS y la relación AGPI:AGS. No existieron efectos significativos de la interacción entre fecha de siembra y genotipos sobre ninguna variable de la calidad del grano (Tabla 4.4).

Los resultados muestran que el porcentaje de aceite disminuyó a medida que se atrasó la fecha de siembra (Tabla 4.5), posiblemente debido a ciclos más cortos y a menores temperaturas durante el llenado de granos (Tablas 4.6 y 4.7). Un comportamiento contrario se observó en el porcentaje de proteínas que aumentó a medida que se atrasó la fecha de siembra (Tablas 4.6).

Tabla 4.4. Cuadrados medios para fecha de siembra, genotipos y su interacción para el porcentaje de aceite, el porcentaje de proteínas y la composición lipídica. El perfil lipídico fue determinado para los ciclos agrícola 2017 y 2018, mientras que porcentaje de proteínas solo para el ciclo agrícola 2017.

Fuente de variación	Composición del grano		Composición de ácidos grasos del grano								
	Aceite	Proteína	Palmitico	Estearico	Oleico	Linoleico	Linoléico	$\Omega 6:\Omega 3$	$\Sigma AGPI$	ΣAGS	AGPI:AGS
Fecha de siembra (FS)	36,76 ^{***}	0,02 ^{***}	0,80 ^{***}	0,79 ^{***}	1,86 ^{***}	3,49 ^{***}	6,83 ^{***}	9,86 ^{***}	2,31 ^{***}	0,36 ^{***}	0,51 ^{**}
Genotipo (G)	1,39	0,02 ^{**}	0,54 ^{***}	0,03	0,35	12,53 ^{***}	10,46 ^{***}	32,8 ^{***}	0,09	0,82 ^{***}	1,06 [*]
FS * G	2,17	0,0015	0,03	0,02	0,12	0,54	0,73	1,65	0,17	0,03	0,78
Bloque	5,35	0,00089	0,06	0,02	0,08	0,30	0,49	1,00	0,24	0,09	0,11

$\Omega 6$: Ácido Linoleico; $\Omega 3$: Ácido Linoléico; ΣAGS : Ácidos grasos saturados; $\Sigma AGPI$: Ácidos grasos poli-insaturados.

* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$.

Tabla 4.5. Porcentaje de aceite y proteínas y composición lipídica de los granos para siete fechas de siembra y dos genotipos. El perfil lipídico fue determinado para los ciclos 2017 y 2018, mientras que el porcentaje de proteína sólo para el ciclo 2017.

Ciclo de siembra	Fecha de siembra	Aceite (%)	Proteína (%)	Palmitico (%)	Estearico (%)	Oleico (%)	Linoleico (%)	Linolenico (%)	Ω6:Ω3 (%)	ΣAGPI	ΣAGS	AGPI:AGS											
Fecha de siembra																							
2017	3-ene	35,65	a	19,17	b	6,30	de	3,04	a	6,40	a	18,49	bcd	65,78	cd	0,28	bc	84,27	c	9,34	a	9,03	a
2017	24-ene	34,86	ab	19,90	b	6,10	f	2,60	b	6,17	a	18,08	cd	67,04	b	0,27	cd	85,13	b	8,71	b	9,78	c
2017	7-feb	34,30	ab	19,48	b	6,24	ef	2,48	b	6,32	a	18,72	bcd	66,24	bc	0,28	bc	84,96	b	8,72	b	9,75	c
2017	21-feb	32,00	abc	20,94	a	6,47	cd	2,32	c	6,36	a	19,02	bcd	65,84	cd	0,29	b	84,85	bc	8,79	b	9,67	bc
2018	15-feb	34,47	ab	-	-	6,56	bc	2,32	c	5,02	b	17,81	d	68,29	a	0,26	d	86,09	a	8,89	b	9,70	bc
2018	26-feb	31,61	bc	-	-	6,73	bc	2,03	d	5,36	bc	18,87	bcd	67,01	b	0,28	bc	85,88	a	8,76	b	9,81	c
2018	6-mar	28,58	c	-	-	7,19	a	1,97	d	5,61	c	20,17	a	65,06	c	0,31	a	85,23	b	9,16	a	9,33	a
Genotipo																							
	Blanco (B)	32,25	a	19,95	a	6,63	a	2,42	a	5,80	a	18,19	a	66,96	a	0,27	a	85,15	a	9,05	a	9,42	a
	Negro (N)	32,88	a	19,79	a	6,40	b	2,37	a	5,98	a	19,28	b	65,97	b	0,29	b	85,25	a	8,77	b	9,74	b

Letras diferentes muestran diferencias significativas entre fechas de siembra y/o genotipos mediante el test LSD de Fisher con una $p < 0,05$.
 Ω6: Ácido linoleico; Ω3: Ácido linolenico; ΣAGS: Ácidos grasos saturados; ΣAGPI: Ácidos grasos poli-insaturados.

Tabla 4.6. Temperaturas promedios medias, mínimas y máximas para el período de llenado (*) para los ciclos agrícolas 2017 y 2018 en chíá. RIA y Duración representan la radiación interceptada acumulada y el tiempo térmico durante el llenado de los granos.

Ciclo	Fecha de Siembra	Temperatura (°C)						RIA (MJ m ⁻²)	Duración (°Cd)
		Diaria			Nocturna				
		Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima		
2017	3-ene	13,2	8,2	20,3	11,1	8,6	15,7	875	686
2017	24-ene	13,1	8,1	20,2	11,0	8,5	15,5	796	655
2017	7-feb	12,8	7,6	20,2	10,6	8,1	15,3	685	625
2017	21-feb	12,6	7,1	20,5	10,4	7,7	15,7	598	620
2018	15-feb	12,3	6,7	20,6	9,9	7,1	14,7	761	590
2018	26-feb	12,2	6,8	20,3	9,9	7,2	14,4	667	539
2018	6-mar	10,2	4,3	18,6	7,6	4,7	12,8	524	464

(*)El período de llenado fue considerado como el tiempo que transcurre desde plena floración hasta madurez fisiológica para todas las parcelas de experimentación.

El porcentaje de aceite en el grano de chíá se correlacionó significativamente y positivamente con las temperaturas diurnas y nocturnas y la RIA durante el periodo de llenado de granos (Tabla 4.7), mientras que el porcentaje de proteínas se correlacionó de manera significativa y negativa con dichas variables ambientales a excepción de la temperatura máxima diurna (Tabla 4.7). Este comportamiento característico de las oleaginosas derivó en una asociación negativa y significativa ($R^2 = 0,19$; $p < 0,05$; $n = 20$) entre los porcentajes de aceite y proteínas (Figura 4.8).

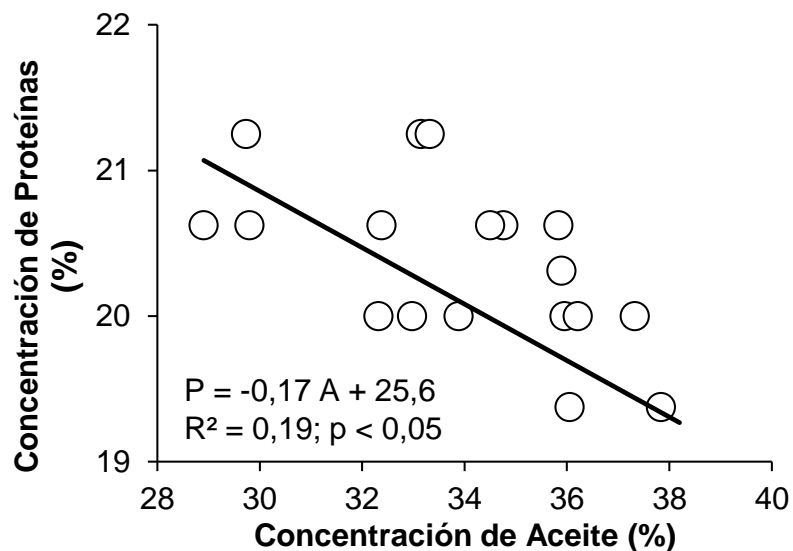


Figura 4.8. Relación entre la concentración de proteínas (P) y la concentración de aceite (A), expresados en porcentaje. Se muestra la ecuación de regresión lineal con su correspondiente coeficiente de regresión (R^2) y valor p.

De los ácidos grasos saturados, existió una tendencia al aumento de ácido palmítico y una disminución de ácido esteárico con el atraso de la fecha de siembra. No existió ninguna tendencia clara de los ácidos grasos insaturados con la fecha de siembra (Tabla 4.5). Sin embargo, existió un claro efecto de la temperatura durante el llenado del grano sobre el perfil lipídico: las concentraciones de los ácidos palmítico y linoleico disminuyeron, y las concentraciones de los ácidos esteárico y linolénico aumentaron, al incrementar la temperatura diurna (Tabla 4.7). Adicionalmente, la concentración de ácido palmítico disminuyó y la de oleico aumento, con el aumento de la radiación interceptada en el llenado de grano (Tabla 4.7).

Tabla 4.7. Coeficientes de correlación entre los atributos de calidad de los granos de chía y condiciones ambientales en los ciclos 2017 y 2018. La composición del aceite y el perfil lipídico se realizaron para los ciclos 2017 y 2018, mientras que la concentración de proteínas sólo para el ciclo 2017.

	Composición lipídica (%)						
	Aceite (%)	Proteína (%)	Palmítico	Esteárico	Oleico	Linoleico	Linolénico
T med. diurna (°C)	0,66***	-0,55**	-0,75***	0,64***	0,15	-0,61***	0,47***
T mín. diurna (°C)	0,66***	-0,59***	-0,76***	0,69***	0,20	-0,63***	0,45***
T máx. diurna (°C)	0,51***	0,56***	-0,52***	0,37**	-0,08	-0,59***	0,57***
T med. noc. (°C)	0,65***	-0,57***	-0,76***	0,68***	0,21	-0,62***	0,45***
T mín. noc. (°C)	0,66***	-0,58***	-0,77***	0,69***	0,23	-0,62***	0,44***
T máx. noc. (°C)	0,63***	-0,26	-0,75***	0,68***	0,27	-0,59***	0,40**
RIA (MJ m ⁻²)	0,54***	-0,56***	-0,63***	0,94	0,53***	-0,31	-0,06

p < 0,01; *p < 0,001.

RIA: Radiación interceptada acumulada. T: Temperatura.

En los casos particulares del porcentaje de aceite y concentración de ácido oleico, se encontró que existe una relación bi-lineal con la cantidad de radiación interceptada acumulada durante el llenado de grano. Se observó que existe un umbral de 1231 MJ m⁻² de radiación interceptada acumulada a partir del cual ya no se producirían aumentos en el porcentaje de aceite en chía (Figura 4.9). Similarmente, el umbral de radiación interceptada acumulada a partir del cual ya no se producirían aumentos en la concentración de ácido oleico fue 1472 MJ m⁻² (Figura 4.10).

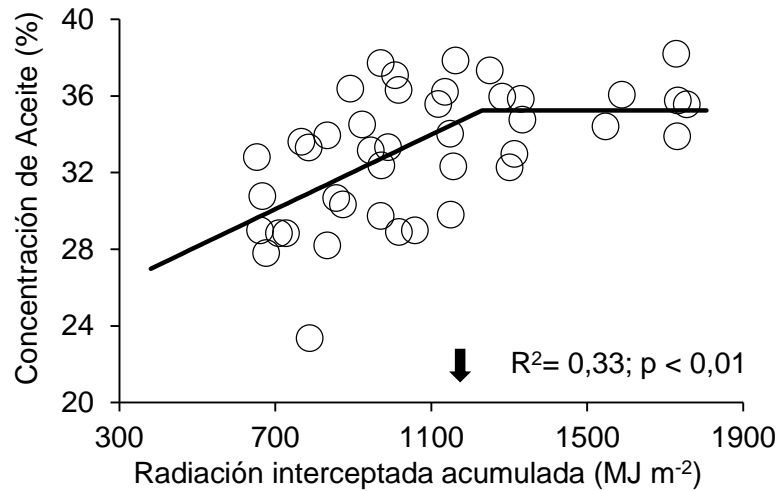


Figura 4.9. Relación entre la radiación interceptada acumulada durante el llenado de grano y el porcentaje de aceite en grano en chía (Aceite (%) = $23 + 0,0097 * MJ m^{-2}$, para $MJ m^{-2} < 1231$; Aceite (%) = $23 + 0,0097 * 1231$, para $MJ m^{-2} \geq 1231$; $R^2 = 0,33$). La flecha negra indica el cambio en la dinámica de acumulación de aceite a medida que cambia la RIA. Se muestra la ecuación de regresión lineal con su correspondiente coeficiente de regresión (R^2) y valor p.

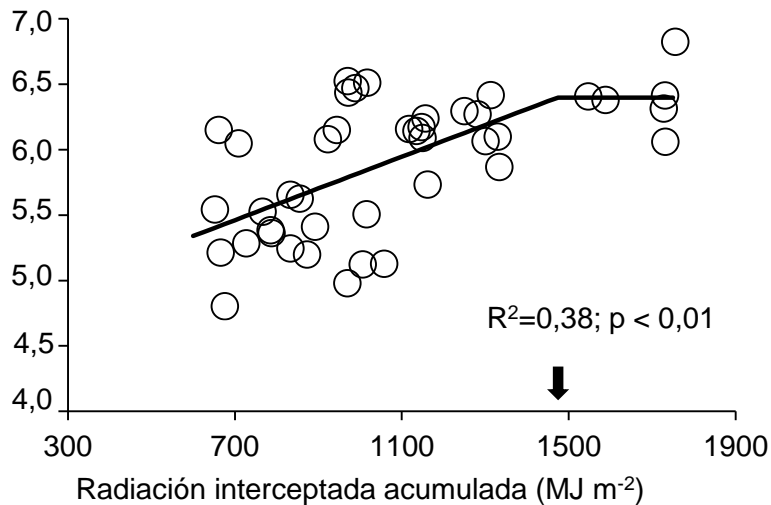


Figura 4.10. Relación entre la radiación interceptada acumulada durante el llenado de grano y la concentración de ácido oleico en el aceite de chía (Oleico (%) = $4,61 + 0,00121 * MJ m^{-2}$, para $MJ m^{-2} < 1472$; Oleico (%) = $4,61 + 0,00121 * 1472$, para $MJ m^{-2} \geq 1472$; $R^2 = 0,38$). La flecha negra indica el cambio en la dinámica de acumulación de ácido oleico a medida que cambia la RIA. Se muestra la ecuación de regresión lineal con su correspondiente coeficiente de regresión (R^2) y valor p.

Se encontraron asociaciones significativas entre los ácidos grasos. La concentración de ácido palmítico estuvo significativamente y negativamente asociada con las concentraciones de sus

sucesores, esteárico ($R^2 = 0,33$; $p < 0,01$; $n = 42$), oleico ($R^2 = 0,20$; $p < 0,05$; $n = 42$) (Figura 4.11, a y b). La concentración de ácido oleico presentó una asociación significativa y positiva con la concentración de su antecesor el ácido esteárico ($R^2 = 0,37$; $p < 0,0001$; $n = 42$) (Figura 4.11, c) y significativa pero negativa con la concentración de ácido linolénico ($R^2 = 0,28$; $p < 0,01$; $n = 42$) (Figura 4.11, d). La concentración de ácido linoleico presentó una asociación significativa y negativa con la concentración de ácido linolénico ($R^2 = 0,69$; $p < 0,05$; $n = 42$) (Figura 4.11, e). Las asociaciones más importantes fueron entre ácidos grasos de cadenas cercanas (palmítico con esteárico y/o oleico, oleico con esteárico, y linoleico con linolénico).

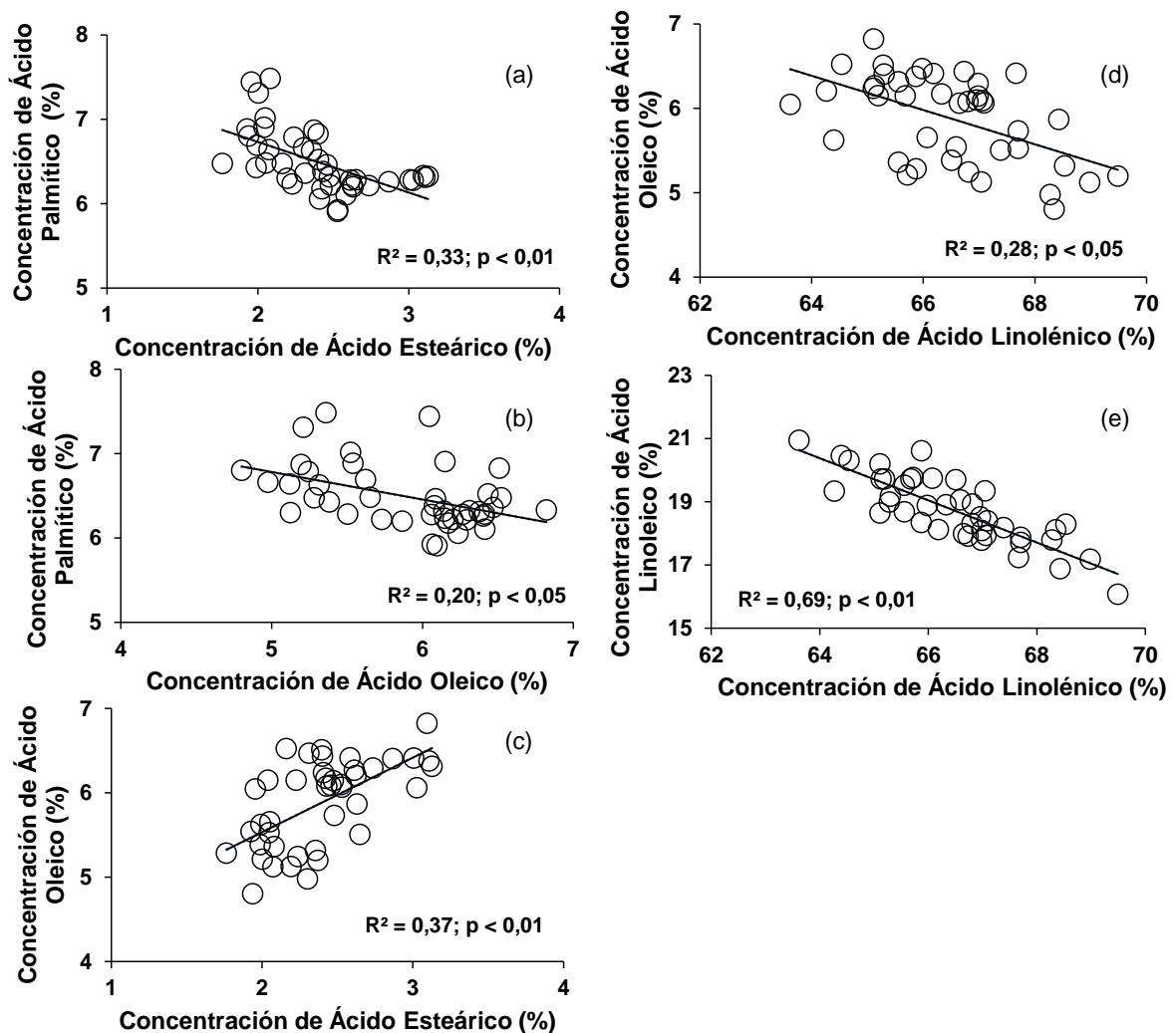


Figura 4.11. Relaciones entre las concentraciones de (a) ácidos palmítico y esteárico, (b) ácidos palmítico y oleico, (c) ácidos oleico y esteárico, (d) ácidos oleico y linolénico y (e) ácidos linoleico y linolénico. Se muestra la ecuación de regresión lineal con su correspondiente coeficiente de regresión (R^2) y valores p .

Las diferencias encontradas entre genotipos para la composición lipídica muestran que el genotipo blanco presentó mayor proporción de los ácidos palmítico y linolénico, mientras que

el genotipo negro presentó mayor proporción del ácido linoleico. Ambos genotipos presentaron concentraciones similares de los ácidos esteárico y oleico (Tabla 4.5). Esto derivó en que el genotipo blanco presentó menor proporción del ácido linoleico respecto al linolénico (relación $\Omega 6:\Omega 3$) que el genotipo negro y menor proporción total de ácidos grasos poliinsaturados respecto a los saturados (relación AGPI:AGS) que el genotipo negro (Tabla 4.5).

4.4 Discusión

Las fechas de siembras escalonadas expusieron al cultivo a variaciones en los regímenes de radiación, temperaturas y fotoperiodo durante el llenado de los granos, algo que también ocurrió en el período de pre-floración (Capítulo 3). Estas variaciones en las condiciones ambientales produjeron cambios importantes en la duración del ciclo del cultivo y, como consecuencia de ello, también en el rendimiento y calidad de los granos de la chía cultivada sin limitaciones de nutrientes y bajo riego presurizado. Similares resultados se encontraron para otros cultivos mayores en distintos lugares del mundo (Duncan et al., 1973; Knapp y Shaw Reid, 1981; Anderson y Vasilas, 1985; Cirilo y Andrade, 1994; 1995; Hussain y Pooni, 1997).

4.4.1 Determinación del rendimiento del cultivo

Teniendo en cuenta el modelo biológico, el retraso en la fecha de siembra en chía generó importantes reducciones en la temperatura, la radiación y el fotoperíodo incidentes durante el ciclo del cultivo (especialmente durante el llenado de grano) lo que llevó a disminuciones en la biomasa seca total, la radiación interceptada acumulada y la eficiencia en el uso de la radiación, repercutiendo finalmente en disminuciones del rendimiento. Un menor rendimiento asociado a una menor duración del ciclo del cultivo, menor temperatura y menor cantidad de radiación interceptada acumulada fue reportado para maíz, soja y girasol (Aguirrezábal et al., 2003; Calviño et al., 2003; Capristo et al., 2007).

La acumulación de biomasa en chía presentó un ajuste robusto con la radiación interceptada acumulada, pero la eficiencia del cultivo para usar esa radiación y transformarla en biomasa en el período post-floración fue baja, cualquiera sea la fecha de siembra analizada (0,88 y 0,50 g MJ⁻² para EUR en pre- y post-floración, respectivamente. Datos no mostrados). Al igual que ocurre en otras oleaginosas como el girasol (> 45% de aceite y ~ 20% de proteínas) o soja (~ 20% de aceite y 40% de proteínas), los granos de chía son ricos en aceite (> 30%) y proteínas (~ 20%). En estos cultivos oleaginosos, la mayor exigencia de energía para el llenado de grano es uno de los motivos que explican los menores valores de EUR durante el crecimiento reproductivo comparado con cereales (Hall et al, 1995). El costo de síntesis de aceite es de 3,03 gramos de glucosa por gramo de aceite, mientras que solo se necesita 1,21

gramos de glucosa por gramo de carbohidrato (Whitfield et al, 1989; Trápani et al., 1992). Es posible hipotetizar que, al igual que ocurre en el girasol y la soja, las bajas EUR durante el crecimiento reproductivo pudieran obedecer al elevado coste energético que demanda producir aceite (cerca de la mitad del peso del grano).

Por otro lado, la EUR es también función de factores ambientales como la temperatura. Carberry et al. (1989) reportaron una relación positiva entre la temperatura media y la EUR para temperaturas medias por debajo de los 20 °C. Los rangos de temperatura para las fechas de siembra tardías reportados en este trabajo estuvieron por debajo del límite de los 20 °C reportados por Carberry. Esto permite hipotetizar que, fechas de siembras tempranas, que experimentaron temperaturas medias más favorables para el proceso fotosintético, permitieron alcanzar mayores eficiencias en el uso de la radiación que en fechas de siembra tardía.

La partición de la materia seca a grano o índice de cosecha no presentó una tendencia marcada con las fechas de siembra de la chíá. Los mayores IC se registraron en fechas de siembra intermedias (entre fines de enero y mediados de febrero), donde existió un mejor balance entre el crecimiento vegetativo y reproductivo en respuesta a las condiciones ambientales (principalmente temperatura y fotoperíodo). Fechas de siembras muy tempranas (mediados de diciembre a inicios de enero, sin estructura preventiva para el vuelco) generaron un crecimiento excesivo de la parte vegetativa produciendo el vuelco del cultivo y penalizando el rendimiento, mientras que fechas de siembra tardías generaron poco crecimiento vegetativo por alcanzar muy rápido el umbral de fotoperíodo para inducir a floración (Capítulo 3), penalizando el rendimiento por escaso crecimiento y condiciones ambientales adversas durante el llenado de granos. Al igual que ocurre en el presente trabajo, en maíz y girasol también se encontraron menores IC en siembras tardías (Cirilo y Andrade, 1994). Baginsky et al. (2016) reportó alta variabilidad para el IC de chíá, reportaron valores cercanos al 40%, muy por encima de los encontrados para las condiciones experimentales de esta tesis.

Los diferentes genotipos aquí estudiados presentaron diferencias en cuanto al índice de cosecha, aunque la misma fue solo del 2%. Resultados contradictorios fueron reportados por Baginsky et al. (2016) para los genotipos blanco y negro sembrados en Chile en el ciclo agrícola 2013, ya que en una sola localidad (Las Cruces) de las tres localidades ensayadas se encontró diferencias entre genotipos para el índice de cosecha. Es evidente que este componente del rendimiento presenta espacio para la mejora genética, no solo por su variabilidad, sino también por sus bajos valores. Además, los resultados necesitan ser confirmados con una mayor exploración de los mecanismos de asignación de fotoasimilados entre estructuras reproductivas y vegetativas.

En general, todos los componentes del rendimiento de la chía fueron mayores para las fechas de siembras tempranas. El número de granos fue el componente del rendimiento que mejor explicó el mismo, presentando menor relevancia el peso de mil granos. Estos resultados coinciden con los reportados en cultivos mayores como girasol, soja y maíz (Cirilo y Andrade, 1994), y en chía sembrada en las mismas condiciones agroecológicas que el presente estudio (Diez et al., 2021). Se debe destacar que, si bien ambos genotipos presentaron como principal determinante del rendimiento el número de granos, el genotipo blanco presentó mayor peso de mil granos que el genotipo negro. Éste último tendió a presentar mayor número de granos (aunque de manera marginal).

El atraso de la fecha de siembra penalizó el número de granos del cultivo, posiblemente debido a que las condiciones ambientales durante su determinación fueron menos favorables que en fechas de siembras tempranas. Dado que el número de granos esta mediado por la tasa de crecimiento durante el período crítico de los cultivos (Tollenaar et al., 1992; Andrade et al., 2005; Arisnabarreta y Miralles, 2008; Bertero y Ruiz, 2008; Sandaña y Calderini, 2012), menores radiaciones y temperaturas incidentes en este período crítico pueden explicar la reducción del número de granos y del rendimiento. Precisamente, el amplio período crítico reportado para chía (desde 6 PHE hasta 14 días después del inicio de floración; Diez et al., 2021), expondría al cultivo sembrado en fechas de siembra tardías a condiciones menos favorables para su crecimiento en momentos en los que se están determinando importantes componentes del rendimiento.

El atraso de la fecha de siembra también afectó la partición de fotoasimilados dentro de las estructuras reproductivas (número de granos por unidad de peso seco de verticilastro a cosecha). Se podría plantear la hipótesis de que en fechas de siembra tardías la reducción del número de granos por unidad de peso seco de verticilastro a cosecha estaría asociada a que, en éstas fechas, se destinaron menor cantidad de fotoasimilados para el llenado de los granos y favorecieron otras estructuras reproductivas del verticilastro. Es interesante destacar que, el genotipo negro, presentó mayor partición de asimilados a nivel de verticilastros que el genotipo blanco, lo cual podría explicar su mayor (aunque marginal: $p < 0,1$) número de granos y rendimiento.

4.4.2 Determinación de la calidad de granos

Dado que los experimentos realizados no consistieron en una manipulación directa de temperatura, radiación y/o fotoperíodo durante el llenado de los granos, la variabilidad encontrada en estas variables ambientales fue reducida y representó el rango que naturalmente explora este cultivo en el noroeste de Argentina. A pesar de ello, los datos logrados constituyen los primeros hallazgos que relacionan el efecto de factores ambientales

sobre la determinación de la calidad de los granos de chíá. Los resultados aquí presentados apoyan los hallazgos en otros cultivos de que los factores ambientales durante el periodo de llenado de granos afectan la síntesis total de proteínas, la síntesis total de aceite y su composición lipídica (Canvin et al., 1965; Harwood et al., 1994). Entre ellos, la temperatura ha sido identificada como el principal factor que afecta el perfil lipídico de los granos (Angeloni et al., 2017; Izquierdo y Aguirrezábal, 2008; Velasco y Fernández Martínez, 2002), algo también observado en este estudio para chíá.

Las concentraciones de proteínas encontradas en este trabajo se encuentran en el rango de los reportados por otros estudios en los que se compara los porcentajes de proteínas en granos de chíá cultivada en ambientes tropicales y subtropicales (Ayerza y Coates, 2004, 2009a, 2009b, 2011; Kenneth et al., 2020), y en altas latitudes (Grimes et al., 2019).

Los resultados muestran una asociación negativa entre el porcentaje de proteínas y las temperaturas diurnas (excepto la máxima) y nocturnas durante el llenado de grano. Sin embargo, Ayerza y Coates (2011) muestran que, en ambientes elevados con menores temperaturas medias durante el ciclo del cultivo, el porcentaje de proteínas fue menor que en ambientes bajos con temperaturas más altas. Esto demuestra una respuesta diferencial de la acumulación de proteínas en chíá según el rango de temperatura en el cual los granos estén creciendo. Sin embargo, las diferencias entre los ambientes analizados por Ayerza y Coates (2011) (temperaturas medias durante todo el ciclo de cultivo de 16 a 24 °C) y los del presente estudio (temperaturas medias diurnas durante el periodo de llenado de 8,9 a 12,1 °C), son marcadamente diferentes. En soja, se reportó una relación cuadrática entre el porcentaje de proteínas y la temperatura en cultivares de distintos grupos de madurez en ambientes de latitudes contrastantes. Se observó que el porcentaje de proteína decrece con aumentos en la temperatura entre los 14 y los 20 °C, y que por encima de los 22 °C la concentración de proteína aumenta al aumentar la temperatura (Piper y Boote, 1999). Mas allá de las diferencias ambientales entre los estudios de Ayerza y Coates y los de esta tesis, es posible hipotetizar que un modelo cuadrático similar al de soja podría explicar las diferencias entre los resultados contrastantes de ambos estudios. Para ello, se requeriría diseñar experimentos manipulativos de la temperatura y/o una red de ensayos que permita explorar mayor variabilidad ambiental que la aquí obtenida.

Los resultados del porcentaje de aceite encontrados en este trabajo (28,6 a 35,6%) son similares a los reportados en otros estudios en ambientes similares de Salta y Jujuy (30,0 a 38,6%; Ayerza, 1996; Ayerza y Coates, 1995, 1998, 2011). Estos valores también son similares que los obtenidos en la región de origen de la chíá (31% en Jalisco, Méjico; Ayerza y Coates, 2005) y en altas latitudes (32,2-33,8% en Alemania; Grimes et al., 2019). Los valores

más bajos de aceite en esta tesis fueron obtenidos para la última fecha de siembra del ciclo agrícola 2018 (28%), algo similar a lo ocurrido en los valles inter-andinos de Ecuador para la selección Tilitic en la localidad de Patate (27,5%; Ayerza y Coates, 2009 b).

La relación positiva entre el porcentaje de aceite y las temperaturas diurnas y nocturnas encontradas en este trabajo también se puede inferir de los datos reportados por Ayerza y Coates (2011) donde en ambientes elevados con menores temperaturas medias durante el ciclo del cultivo el porcentaje de aceites fue menor. La respuesta contradictoria del porcentaje de proteínas y aceite a la temperatura podría estar explicando la relación negativa entre ambas variables. Esta relación negativa, que bajo estos ambientes no había sido reportada aún en chíá, ha sido muy bien documentada en la mayoría de los cultivos de oleaginosas (López Pereira et al., 2000; Morrison et al., 2000 y Uribe Larrea et al., 2004). Sin embargo, la pendiente de la recta de esa relación (0,17) es significativamente diferente a 1, sugiriendo que otro componente del grano (como ser carbohidratos; Bianculli et al., 2016; Diovisalvi et al., 2018) y/o el asincronismo en la acumulación de aceite y proteínas (Connor y Sadras, 1992; Diovisalvi et al., 2018) podrían estar afectando la relación entre ambas variables.

El porcentaje de aceite presentó una relación bilineal con la cantidad de radiación interceptada acumulada durante el llenado de grano. Si bien, en chíá, no se han reportado asociaciones entre la radiación interceptada acumulada y el porcentaje de aceite, en otros cultivos como girasol (Seiler et al., 1986, Dosio et al., 2000), soja y maíz (Izquierdo et al., 2008), se ha reportado una relación bilineal entre estas variables. A pesar de la escasa variabilidad en la cantidad de radiación interceptada acumulada en el llenado de grano y en el porcentaje de aceite de nuestros ensayos, al utilizar el modelo ajustado por Dosio et al. (2000) e Izquierdo et al. (2008), se observa un umbral de 1231 MJ m⁻² de radiación interceptada acumulada a partir del cual ya no se producirían aumentos en el porcentaje de aceite en chíá.

A diferencia de lo reportado en girasol (Izquierdo et al., 2002, 2006), colza (Deng y Scarth, 1998) y soja (Kane et al., 1997), incrementos en la temperatura durante el llenado de granos no produjeron incrementos en el porcentaje de ácido oleico. Sin embargo, estos incrementos de temperaturas generaron un comportamiento opuesto en los ácidos grasos polinsaturados de la chíá ya que produjeron un menor porcentaje de linoleico y un mayor porcentaje de linolénico. Resultados opuestos respecto al ácido linolénico se pueden observar en los datos reportados en chíá por Ayerza y Coates (2011). Este comportamiento contradictorio de la chíá no permite establecer con exactitud si temperaturas más frescas durante el llenado de granos, coincidentes con fechas de siembras tardías, aumentan el nivel de insaturación de los ácidos grasos como si ocurre en otros cultivos de oleaginosas como la soja (Carver et al., 1986;

Thomas et al., 2003; Kumar et al., 2006). Es evidente la necesidad de más estudios manipulativos de la temperatura en chía para poder dilucidar las relaciones mencionadas.

La radiación solar interceptada por las plantas durante el llenado de granos también modifica la composición lipídica (Harwood, 1994; Williams a, 1999). Al igual que el porcentaje de aceite, en chía, la concentración de ácido oleico presentó una relación bilineal con la cantidad de radiación interceptada acumulada. Izquierdo et al. (2009) reportó una relación bilineal entre la acumulación de ácido oleico y la radiación interceptada acumulada en girasol, soja, maíz y canola. Utilizando el modelo propuesto por Izquierdo, se observa que existe un umbral de 1472 MJ m⁻² de radiación interceptada acumulada en el llenado de grano a partir del cual no se acumularía más ácido oleico en granos a pesar del incremento en la cantidad de la radiación interceptada acumulada. Sin embargo, los rangos de variación de la radiación interceptada acumulada y del ácido oleico de nuestros experimentos son estrechos, por lo que más experimentos manipulativos del efecto de cambios de la cantidad de radiación interceptada acumulada sobre el perfil lipídico de la chía son necesarios.

La relación altamente significativa y negativa encontrada en este trabajo entre el ácido polinsaturado linolénico y sus antecesores menos insaturados, el ácido oleico y el ácido linoleico, están en concordancia con observaciones previas encontradas por Ayerza (2009) y Ayerza y Coates (2011) para chía, y para numerosos otros cultivos que son fuente natural de ácido linolénico omega 3 como almendras (Abdallah et al., 1998), castañas (Pires Borges et al., 2007), soja (Thomas et al., 2003) y lino (Wakjira et al., 2003). Una alta relación de ácidos grasos omega 6 (linoleico) y omega 3 (linolénico) en la dieta ha sido identificada como un factor de riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares (Ayerza y Coates, 2005). Una forma de reducir ese riesgo es mantener la proporción de ácidos grasos omega 6 y omega 3 en la dieta lo más baja posible, siendo 1:1 la relación ideal. La relación $\Omega 6:\Omega 3$ encontrada en este trabajo fue de 0,27-0,32, similar a la reportada en otros trabajos en el mismo ambiente (Ayerza y Coates 2004, 2009a) y diferente ambiente (Ayerza y Coates 2009b).

El genotipo blanco presentó mayor proporción y cantidad del ácido linolénico que linoleico respecto al genotipo negro. Sin embargo, no se encontraron tendencias que demuestren la incidencia de los factores ambientales sobre dicha relación. La chía, en Salta, posee una alta relación AGPI:AGS, en el rango de 8,8 a 9,8, valores similares a los reportados por Ayerza y Coates (2009) en la región del Chaco semiárido en Argentina (9,0). En este estudio, el genotipo negro presentó mayor proporción de ácidos grasos poliinsaturados respecto de saturados que el genotipo blanco. Sin embargo, no se encontraron tendencias que demuestren la incidencia de los factores ambientales sobre esta relación.

La disminución del fotoperíodo con el atraso de la fecha de siembra también afectó la calidad de granos de la chía, a través de la disminución de la RIA asociada a una menor duración del período de llenado de granos. La cantidad de radiación que incidió diariamente sobre el cultivo decayó progresivamente al avanzar la estación de crecimiento después de floración. Tanto siembras tempranas (3-ene hasta 15-feb), como siembras tardías (21 de febrero en adelante), acortaron el período de crecimiento reproductivo, siendo más acentuado el efecto mientras más tardía era la siembra. Esta respuesta sugiere que el desarrollo reproductivo de la chía también tiene control fotoperiódico, ya que las temperaturas en descenso a medida que atrasamos la fecha de siembra debieran alargar la sub-fase iFL-MF. Este comportamiento es observado también en soja (Grimm et al., 1994).

Si bien se desconocen los mecanismos mediante los cuales los factores ambientales estudiados modifican la cantidad y calidad del aceite de chía, estos nuevos conocimientos ayudarán a identificar con mayor claridad que nuevos experimentos se deben desarrollar para en un futuro, entender los mismos. Además, permitirán diseñar prácticas de manejo (por ejemplo, elección de fechas de siembra, selección del genotipo, etc.) para cada sitio de cultivo que ayuden a maximizar la cantidad y calidad del aceite de los granos de chía. Finalmente, esta información novel es de vital importancia para el diseño de mejores estrategias de selección para la obtención de genotipos de chía de mayor rendimiento y calidad mejorada.

4.5 Conclusión

Para las condiciones experimentales de este trabajo (Valle de Lerma, Salta, Argentina), se demostró que, independientemente de la genética de chía utilizada, las mejores condiciones ambientales son las que se generan en fechas de siembra desde enero a mediados de febrero (3-ene, 24-ene, 7-feb, 15-feb), donde las plantas desarrollan mayores rendimientos y número de granos, su principal determinante numérico. En estas fechas de siembra es donde el cultivo intercepta mayor cantidad de radiación y donde la utiliza de manera más eficiente, generando mayor cantidad de biomasa seca total y particiona la misma de manera más eficiente a verticilastros y granos. Precisamente, una de las diferencias destacadas entre genotipos fue la mayor partición de asimilados a nivel de verticilastros en el genotipo negro, lo cual repercutió en su mayor número de granos y rendimiento (aunque estos fueran marginales).

Los hallazgos reportados en este trabajo indican que las temperaturas diurnas y nocturnas, durante el periodo de llenado presentan una relación positiva con el porcentaje de aceite. No existen evidencias suficientes para determinar el efecto de la temperatura sobre los diferentes ácidos grasos. Se logró determinar el efecto de la radiación interceptada acumulada durante el llenado de los granos sobre el porcentaje de aceite y la concentración de ácido oleico, determinando umbrales a partir de los cuáles ya no hay respuesta (1231 y 1472 MJ m⁻² para

porcentaje de aceite y la concentración de ácido oleico, respectivamente). Las diferencias genóticas en la calidad del grano solo se expresaron a nivel agregado donde, el genotipo blanco, presentó mayor proporción y cantidad del ácido linolénico que linoleico y menor proporción de ácidos grasos poliinsaturados respecto de saturados que el genotipo negro.

4.6 Bibliografía

- Abdallah, A, Ahumada, M. H. y Gradziel, T. M. 1998. Oil content and fatty acid composition of almond kernels from different genotypes and California production regions. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 123(6), 1029-1033.
- Aguirrezábal, L. A. N., *et al.* 2015. Mejorando la calidad del grano: Herramientas ecofisiológicas y de modelado para desarrollar estrategias de manejo y mejoramiento. En: Victor O. Sadras y Daniel Calderini, (Editores): *Crop Physiology*, Oxford: Academic Press; 2015, p. 423-465. ISBN: 978-0-12-417104-6. Copyright 2015 Elsevier Inc. Academic Press.
- Andrade, F.H., Ferreiro, M.A., 1996. Reproductive growth of maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crop. Res.* 48, 155–165. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(96\)01017-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(96)01017-9).
- Andrade, F. H., Sadras, V. O., Vega, C. R. C. y Echarte, L. 2013. Determinantes ecofisiológicos del crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz, girasol y soja. Su aplicación al manejo del cultivo, modelado y mejoramiento. Seminario de Formación Profesional. 2013 07 24, 24 de julio de 2013. San Francisco, Córdoba. AR.
- Anderson, L. R., Vasilas, B. L. 1985. Effects of planting date on seasonal patterns of nitrogen assimilation and partitioning by two soybean cultivars. *Journal of plant nutrition*, 8(8), 657-677.
- Angeloni, P., Echarte, M.M., Pereyra Irujo, G., Izquierdo, N.G., Aguirrezábal, L., 2017. Fatty acid composition of high oleic sunflower hybrids in a changing environment. *Field Crop. Res. (Spec. Issue.: Model. Crops Genotype Phenotype a Chang. Clim.)* 202, 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.005>.
- Arisnabarreta, S. y Miralles, D. J. 2008. Critical period for grain number establishment of near isogenic lines of two-and six-rowed barley. *Field Crops Research*, 107(3), 196-202.
- Austin, R. B., Bingham, J., Blackwell, R. D., Evans, L. T., Ford, M. A., Morgan, C. L. y Taylor, M. 1980. Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *The journal of agricultural science*, 94(3), 675-689.

- Ayerza, R. 1995. Oil content and fatty acid composition of chia (*Salvia hispanica L.*) from five northwestern locations in Argentina. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 72, 1079-1081.
- Ayerza, R. y Coates, W. 2005. Chia: rediscovering a forgotten crop of the Aztecs. University of Arizona Press.
- Ayerza, R. H. y Coates, W. 2009. Some quality components of four chia (*Salvia hispanica L.*) genotypes grown under tropical coastal desert ecosystem conditions. *Asian Journal of Plant Sciences*, 8(4), 301.
- Ayerza, R. (h), Coates, W., 2011. Protein content, oil content and fatty acid profiles as potential criteria to determine the origin of commercially growth chia (*Salvia hispanica L.*). *Ind. Crop. Prod.* 34, 1366–1371. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.007>.
- Baginsky, C., Arenas, J., Escobar, H., Garrido, M., Valero, N., Tello, D. y Silva, H. 2016. Growth and yield of chia (*Salvia hispanica L.*) in the Mediterranean and desert climates of Chile. *Chilean journal of agricultural research*, 76(3), 255-264.
- Bianculli, M.L., Aguirrez´abal, L.A.N., Pereyra Irujo, G.A., Echarte, M.M., 2016. Contribution of incident solar radiation on leaves and pods to soybean seed weight and composition. *Eur. J. Agron.* 77, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.03.002>.
- Bochicchio, R., Rossi, R., Labella, R., Bitella, G., Perinola, M., Amato, M. 2015. Effect of sowing density and nitrogen top-dress fertilization on growth and yield of chia (*Salvia hispanica L.*) in a Mediterranean environment: first results. *Ital. J. Agron.* 10, 163-166.
- Cabrera-Santos, D., Ordoñez-Salanueva, C.A., Sampayo-Maldonado, S., Campos, J., Orozco-Segovia, A., Flores-Ortiz, C.M., 2021. Chia (*Salvia hispanica L.*) seed soaking germination, and fatty acid behavior at different temperatures. *Agriculture* 11, 498. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060498>.
- Carberry, P. S., Muchow, R. C. y McCown, R. L. 1989. Testing the CERES-Maize simulation model in a semi-arid tropical environment. *Field Crops Research*, 20(4), 297-315.
- Calviño, P.A., Sadras, V.O., Andrade, F.H., 2003. Development, growth and yield of late-sown soybeans in the southern Pampas. *Eur. J. Agron.* 19, 265–275. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00050-3](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00050-3).
- Canvin, D. T. 1965. The effect of temperature on the oil content and fatty acid composition of the oils from several oil seed crops. *Canadian Journal of Botany*, 43(1), 63-69.

- Capristo, P.R., Rizzalli, R.H., Andrade, F.H., 2007. Ecophysiological yield components of maize hybrids with contrasting maturity. *Agron. J.* 99, 1111–1118. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.036>
- Carver, B. F., Burton, J. W., Carter Jr, T. E. y Wilson, R. F. 1986. Response to Environmental Variation of Soybean Lines selected for Altered Unsaturated Fatty Acid Composition 1. *Crop science*, 26(6), 1176-1181.
- Cirilo, A. G. y Andrade, F. H. 1994. Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crop science*, 34(4), 1039-1043.
- Coates, W. 1996. Production potential of chia in northwestern Argentina. *Industrial Crops and Products*, 5(3), 229-233.
- Coates, W. y Ayerza, R. 1998. Commercial production of chia in Northwestern Argentina. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 75(10), 1417-1420.
- Coates, W. 2011. Protein content, oil content and fatty acid profiles as potential criteria to determine the origin of commercially grown chia (*Salvia hispanica* L.). *Industrial Crops and Products*, 34(2), 1366-1371.
- Connor, D.J., Sadras, V.O., 1992. Physiology of yield expression in sunflower. *Field Crop. Res.* 30, 333–389. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(92\)90006-U](https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90006-U).
- Dar, R.A., Choudhury, R., Kancharla, P.K., Arumugam, N., 2017. The FAD2 gene in plants: occurrence, regulation, and role. *Front. Plant Sci.* 8, 1789. doi: 10.3389/fpls.2017.01789.
- Deng, X. y Scarth, R. 1998. Temperature effects on fatty acid composition during development of low-linolenic oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 75(7), 759-766.
- Diez, J., Anuch Tiranti, J. V., Sadras, V. O., Acreche, M. M. 2021. The critical period for grain yield in chía (*Salvia hispanica* L.). *Crop & Pasture Science*, 72, 213-222.
- Diovisalvi, N., Reussi Calvo, N., Izquierdo, N., Echeverría, H., Divito, G.A., García, F., 2018. Effects of genotype and nitrogen availability on grain yield and quality in sunflower. *Agron. J.* 110, 1532–1543. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.08.0435>.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., Robledo, C.W. 2017 'InfoStat versión 2017.' (Universidad Nacional de Córdoba: Córdoba, Spain).

- Dosio, G. A., Aguirrezábal, L. A., Andrade, F. H. y Pereyra, V. R. 2000. Solar radiation intercepted during seed filling and oil production in two sunflower hybrids. *Crop Science*, 40(6), 1637-1644.
- Duncan, W. G., Shaver, D. L. y Williams, W. A. 1973. Insolation and Temperature Effects on Maize Growth and Yield 1. *Crop Science*, 13(2), 187-191.
- Egli, D.B. 1998. *Biología de semillas y rendimiento de cultivos de granos*. CAB International, Reino Unido, pp. 178.
- Egli, D.B., Bruening, W.P., 2005. Shade and temporal distribution of pod production and pod set in soybean. *Crop Sci.* 45, 1764–1769. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0557>.
- Esteban, A.B., Sicardo, M.D., Mancha, M., Martínez-Rivas, J.M., 2004. Growth temperature control of linoleic acid content in safflower (*Carthamus tinctorius*) seed oil. *J. Agric. Food Chem.* 52, 332–336. Grimes, S.J., Phillips, T.D., Capezzone, F., Graef
- Fischer, R. A. y Stockman, Y. M. 1980. Kernel number per spike in wheat (*Triticum aestivum* L.): responses to preanthesis shading. *Functional Plant Biology*, 7(2), 169-180.
- Fischer, K. S. y Palmer, F. E. 1984. Tropical maize. In: P. R. Gold-sworthy and N. M. Fisher (eds.), *The Physiology of Tropical Fields Crops*. Wiley, New York, pp. 213-248.
- Fischer, R. A. 1985. Physiological limitations to producing wheat in semitropical and tropical environments and possible selection criteria. In *Wheats for more tropical environments. A proceedings of the international symposium, September 24-28, 1984 Mexico DF* (pp. 209-230). CIMMYT.
- Fischer, R. 1985. Número de granos en cultivos de trigo y la influencia de la radiación solar y la temperatura 390. *J. Agric. Sci.* 105, 447–461.
- Garcés, R. y Mancha, M. 1991. In vitro oleate desaturase in developing sunflower seeds. *Phytochemistry*, 30(7), 2127-2130.
- Garcés, R., Sarmiento, C., y Mancha, M. 1992. Temperature regulation of oleate desaturase in sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds. *Planta*, 186(3), 461-465.
- Grimm, S. S., Jones J. W., Boote K. J. y Herzog, D. C, 1994. Modelling the occurrence of reproductive stages after flowering for four soybean cultivars. *Agron. J.* 86: 31-38.
- Grimes, S.J., Phillips, T.D., Capezzone, F., Graeff-Hönninger, S., 2019. Impact of row spacing, sowing density and nitrogen fertilization on yield and quality traits of chia (*Salvia hispanica* L.) cultivated in southwestern Germany. *Agronomy* 2019 (9), 136. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030136>.

- Gunstone, F.D., 2000. Composition and properties of edible oils. In: Hamm, Wolf, Hamilton, R.J., Calliau, G. (Eds.), *Edible Oil Processing*, second ed. Sheffield Academic Press, England, pp. 1–39. <https://doi.org/10.1002/9781118535202.ch1>.
- Hall, A. J.; Connor, D. J. y Sadras, V. O., 1995. Radiation use-efficiency of sunflower crops: Effects of specific leaf nitrogen and ontogeny. *Field Crops Res.* 41:65-77.
- Hao, Y., Bin, Q., Min, J., Wei, L., Xiao-fei, G., Na, L., Zhi-xiang, X., Fang-ling, D., Tongcheng, X., Duo, L., 2021. Effects of α -linolenic acid intake on blood lipid profiles: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 61 (17), 2894–2910. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1790496>.
- Harwood, J. L. 1994. Environmental factors which can alter lipid metabolism. *Progress in lipid research*, 33(1-2), 193-202.
- Hay, R. K. M., Kirby, E. J. M. 1991. Convergence and synchrony-a review of the coordination of development in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 42(5), 661-700.
- Irving, D.W., Shannon, M.C., Breda, V.A., Mackey, B.E., 1988. Salinity effects on yield and oil quality of high-linoleate and high-oleate cultivars of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *J. Agric. Food Chem.* 36, 37–42.
- Izquierdo, N. G., Aguirrezábal, L. A. N., Andrade, F. H. y Pereyra, V. 2002. Night temperature affects fatty acid composition in sunflower oil depending on the hybrid and the phenological stage. *Field Crops Research*, 77(2-3), 115-126.
- Izquierdo, N. G., Aguirrezábal, L. A. N., Andrade, F. H. y Cantarero, M. G. 2006. Modeling the response of fatty acid composition to temperature in a traditional sunflower hybrid. *Agronomy Journal*, 98(3), 451-461.
- Izquierdo, N.G. y Aguirrezábal, L.A.N. 2008. Genetic variability in the response of fatty acid composition to minimum night temperature during grain filling in sunflower. *Field Crops Res.* 106, 116-125.
- Izquierdo, N. G., Dosio G. A. A., Cantarero, M., Lujan, J., Aguirrezábal, L.A.N., 2008. Weight per grain, oil concentration, and solar radiation intercepted during grain filling in black hull and striped hull sunflower hybrids. *Crop. Sci.* 48, 688-699.
- Izquierdo, N. G., Aguirrezábal, L. A. N., Andrade, F. H., Geroudet, C., Valentinuz, O., Iraola, M. P. 2009. Intercepted solar radiation affects oil fatty acid composition in crop species. *Field Crops Research*, 114(1), 66-74.

- Izquierdo, N.G., Benech-Arnold, R., Batlla, D., González Belo, R., Tognetti, J., 2017. Seed composition in oilcrops: its impact on seed germination performance. In: Ahmad, P. (Ed.), *Oil Seed Crops: Yield and Adaptations under Environmental Stress*, first ed. Wiley, Toronto, ON, Canada, pp. 34–51.
- Kabbaj, A., Vervoort, V., Abbott, A., Tersac, M., Bervillé, A. 1996. Expression of stearate oleate and linoleate desaturase genes in sunflower with normal and high oleic contents. *Helia* 19, 1-17.
- Kane, M. V., Steele, C. C., Grabau, L. J., MacKown, C. T. y Hildebrand, D. F. 1997. Early-maturing soybean cropping system: III. Protein and oil contents and oil composition. *Agronomy Journal*, 89(3), 464-469.
- Kargiotidou, A., Deli, D., Galanopoulou, D., Tsaftaris, A., Farmaki, T., 2008. Low temperature and light regulate delta 12 fatty acid desaturases (FAD2) at a transcriptional level in cotton (*Gossypium hirsutum*). *J. Exp. Bot.* 59, 2043–2056. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern065>.
- Kirby, E. J. M. 1988. Analysis of leaf, stem and ear growth in wheat from terminal spikelet stage to anthesis. *Field crops research*, 18(2-3), 127-140.
- Knapp, W. R. 1981. Interactions of hybrid maturity class, planting date, plant population, and nitrogen fertilization on corn performance in New York.
- Kumar, V., Rani, A., Solanki, S., Hussain, S. M. 2006. Influence of growing environment on the biochemical composition and physical characteristics of soybean seed. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(2-3), 188-195.
- Li, J., Liu, J., Sun, X., Liu, Y., 2018. The mathematical prediction model for the oxidative stability of vegetable oils by the main fatty acids composition and thermogravimetric analysis. *LWT* 96, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.003>
- Li-Beisson, Y., Shorrosh, B., Beisson, F., Andersson, M. X., Arondel, V., Bates, P. D. y Ohlrogge, J. 2013. Acyl-lipid metabolism. *The Arabidopsis book/American Society of Plant Biologists*, 11.
- Matsuda, O., Sakamoto, H., Hashimoto, T., Iba, K., 2005. A temperature-sensitive mechanism that regulates post-translational stability of a plastidial ω -3 fatty Acid desaturase (FAD8) in arabidopsis leaf tissues. *J. Biol. Chem.* 280 (5), 3597. <https://doi.org/10.1074/jbc.M407226200>.

- Miralles, D. J., Richards, R. A. y Slafer, G. A. 2000. Duration of the stem elongation period influences the number of fertile florets in wheat and barley. *Functional Plant Biology*, 27(10), 931-940.
- Miralles, D. J., Ferro, B.C. y Slafer, G. A. 2001. Developmental responses to sowing date in wheat, barley and rapeseed. *F. Crop Res.* 71, 211-223.
- Morrison, M. J., Voldeng, H. D. y Cober, E. R. 2000. Agronomic changes from 58 years of genetic improvement of short-season soybean cultivars in Canada. *Agronomy Journal*, 92(4), 780-784.
- Munier-Jolain, NG, Munier-Jolain, NM, Roche, R., Ney, B., Duthion, C., 1998. Seed growth rate in grain legumes II. Seed growth rate depends on cotyledon cell number. *J. Exp. Bot.* 49, 1971– 1976. <https://doi.org/10.1093/jxb/49.329.1971>
- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1973. Determination of total nitrogen in plant material. *Agron. J.* 65, 109–112. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010033x>
- Ohlrogge, J.B., Jaworski, J.G., 1997. Regulation of fatty acid synthesis. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 48, 109–136. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.48.1.109>.
- Pérez Brandán, J., Curti, R.N. y Acreche, M.M. 2019. Etapas de crecimiento fenológico en chía (*Salvia hispanica* L.) según la escala BBCH. *Sci. Hortic. (Amsterdam)* 255, 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.043>.
- Pérez Brandán, J., Curti, R.N., Acreche, M.M., 2021. Developmental responses of chia (*Salvia hispanica* L.) to variations in thermo-photoperiod: impact on subcomponents of grain yield. *Crop Pasture Sci.* 71, 183–189. <https://doi.org/10.1071/CP19218>.
- Piper, E. L. y Boote, K. I. 1999. Temperature and cultivar effects on soybean seed oil and protein concentrations. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(10), 1233-1241.
- Rebetzke, G. J., Pantalone, V. R., Burton, J. W., Carver, B. F. y Wilson, R. F. 1996. Phenotypic variation for saturated fatty acid content in soybean. *Euphytica*, 91(3), 289-295.
- Rolletschek, H., Borisjuk, L., Sánchez-García, A., Gotor, C., Romero, L.C., Martínez Rivas, J.M., Mancha, M., 2007. Temperature-dependent endogenous oxygen concentration regulates microsomal oleate desaturase in developing sunflower seeds. *J. Exp. Bot.* 58, 3171–3181. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm154>

- Sandaña, P. A., Harcha, C. I. y Calderini, D. F. 2009. Sensitivity of yield and grain nitrogen concentration of wheat, lupin and pea to source reduction during grain filling. A comparative survey under high yielding conditions. *Field Crops Research*, 114(2), 233-243.
- Schulte, L.R., Ballard, T., Samarakoon, T., Yao, L., Vadlani, P., Staggenbor, S., Rezac, M., 2013. Increased growing temperature reduces content of polyunsaturated fatty acids in four oilseed crops. *Ind. Crop. Prod.* 51, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.08.075>.
- Seiler, G. J. 1986. Analysis of the relationships of environmental factors with seed oil and fatty acid concentrations of wild annual sunflower. *Field Crops Research*, 15(1), 57-72.
- Slafer, G. A., y Andrade, F. H. 1993. Physiological attributes related to the generation of grain yield in bread wheat cultivars released at different eras. *Field Crops Research*, 31(3-4), 351-367.
- Slafer, G. A., y Rawson, H. M. 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. *Functional Plant Biology*, 21(4), 393-426.
- Slafer, G. A., y Rawson, H. M. 1996. Responses to photoperiod change with phenophase and temperature during wheat development. *Field Crops Research*, 46(1-3), 1-13.
- Slafer, G. A. 2003. Genetic basis of yield as viewed from a crop physiologist's perspective. *Annals of Applied Biology*, 142(2), 117-128.
- Slafer, G. A. y Savin, R. 2007. *Physiology of Crop Yield*. In *Encyclopedia of Plant and Crop Science*. Taylor and Francis: New York.
- Sukhija, P.S., Palmquist, D.L., 1988. Rapid method for determination of total fatty acid content and composition of feedstuffs and feces. *J. Agric. Food Chem.* 36, 1202–1206. <https://doi.org/10.1021/jf00084a019>.
- Tolenaar, M. y Aguilera, A. 1992. Radiation use efficiency of an old and a new maize hybrid. *Agronomy Journal*, 84 (3): 536-541.
- Thomas, J. M. G., Boote, K. J., Allen, L. H., Gallo-Meagher, M., Davis, J. M. 2003. Elevated temperature and carbon dioxide effects on soybean seed composition and transcript abundance. *Crop Science*, 43(4), 1548-1557.
- Vega, C. R. C; Sardras, V. O.; Andrade, F. 461-468.H. y Huart, S. A., 2000. Reproductive allometry in soybean, maize and sunflower. *Ann. Bot.* 85

- Velasco, L. y Fernández-Martínez, J. M. 2002. Breeding oilseed crops for improved oil quality. *Journal of Crop Production*, 5(1-2), 309-344.
- Wakjira, A., Labuschagne, M. T. y Hugo, A. (2004). Variability in oil content and fatty acid composition of Ethiopian and introduced cultivars of linseed. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(6), 601-607.
- Wang, X., Devaiah, S.P., Zhang, W., Welti, R., 2006. Signaling functions of phosphatidic acid. *Prog. Lipid Res.* 45 (3), 250. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2006.01.005>.
- Williams, J.R., Salon, C., Layzell, D.B., 1999. Evidence for light-stimulated fatty acid synthesis in soybean fruit. *Plant Physiol.* 120 (4), 1117–1128. <https://doi.org/10.1104/pp.120.4.1117>.
- Whitefield, D. M.; Connor, D. J. y Hall, A. J.; 1989. Carbon dioxide balance of sunflower (*Helianthus annuus* L.).

Conclusiones generales y Perspectivas futuras

Esta sección de la tesis tiene como objetivos 1) recapitular brevemente los principales hallazgos encontrados a partir de los diferentes ensayos realizados, tanto a campo como bajo condiciones controladas, y 2) identificar posibles líneas de investigación futuras relacionadas con los temas abordados en la tesis.

1) Principales hallazgos de la tesis

Los principales hallazgos de la tesis se dividen en tres tipos de contribuciones: I) conocimiento original, novedoso y universal generado en la tesis que, bajo nuestro conocimiento, no ha sido publicado en otros trabajos científicos; II) conocimiento original que permite aclarar cuestiones poco claras en la literatura o extrapolar la información de otras regiones a las condiciones del Valle de Lerma, Salta; III) conocimiento que confirman, para las condiciones de materiales y métodos utilizadas en esta tesis, hallazgos existentes realizados en distintos ambientes.

I) Conocimiento original, novedoso y universal aportado por esta tesis

I.1. Se desarrolló la primera escala fenológica estandarizada para la chía en base al método propuesto por la Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt and Chemical Industry (BBCH) (Capítulo 2).

I.2. Las temperaturas cardinales de crecimiento y desarrollo de la chía son: temperatura base 6 °C, temperatura óptima 20,2 °C y temperatura máxima 47°C (Capítulo 3).

I.3. El umbral de fotoperíodo crítico para inducción del ápice de vegetativo a reproductivo es 13,16 horas, más allá del cual el cultivo presenta una sensibilidad fotoperiódica de 502 °Cd por hora de atraso en el fotoperíodo (Capítulo 3).

I.4. Existe un alargamiento en la duración de las sub-fases de pre-floración desde primer par de hojas expandidas a inducción del ápice e inducción del ápice a aparición del verticilastro en respuesta a un aumento de las horas de luz (Capítulo 3).

I.5. La duración de la sub-fase de pre-floración primer par de hojas expandidas a inducción del ápice se asoció con el número de hojas expandidas acumuladas (Capítulo 3).

I.6. El filocrono para el período primer par de hojas expandidas a aparición del verticilastro mostró valores similares en respuesta a cambios en el fotoperíodo (rango de 61-79 °Cd hoja⁻¹) (Capítulo 3).

I.7. La extensión de la duración de las sub-fases de pre-floración aumenta el rendimiento del grano de la chía a través de los aumentos en PSV_{FL} (Capítulo 3).

I.8. El PSV_{FL} está relacionado lineal y positivamente con el rendimiento de grano (Capítulo 3).

I.9. Los genotipos disponibles en Argentina se diferencian en que el genotipo negro presenta mayor partición de asimilados a nivel de verticilastros, lo que genera mayor rendimiento (Capítulo 4).

I.10. Las temperaturas, tanto diurnas como nocturnas, durante el periodo de llenado de grano presentan una relación positiva con el porcentaje de aceite, pero no existen evidencias suficientes para determinar el efecto de la temperatura sobre la composición lipídica del mismo (Capítulo 4).

I.11. La radiación interceptada acumulada durante el llenado de los granos presentó efectos positivos sobre el porcentaje de aceite y la concentración de ácido oleico. Sin embargo, en ambos casos existe un valor umbral a partir del cual ya no hay aumento en el porcentaje de aceite a pesar de un aumento en la radiación interceptada acumulada (1231 MJ m^{-2} y 1472 MJ m^{-2} para porcentaje de aceite y ácido oleico, respectivamente) (Capítulo 4).

II) Conocimiento original que permite aclarar cuestiones poco claras en la literatura o extrapolar la información de otras regiones a las condiciones del Valle de Lerma, Salta

II.1. El umbral de fotoperíodo crítico para iniciación floral es 12,91 horas, más allá del cual el cultivo presenta una sensibilidad fotoperiódica de $1160 \text{ }^\circ\text{Cd}$ por hora de atraso en el fotoperíodo. El cultivo presenta una fase vegetativa básica de $603 \text{ }^\circ\text{Cd}$ (Capítulo 3).

II.2. El número de granos fue el componente del rendimiento que mejor explicó el mismo, principalmente a través de sus sub-componentes número de verticilastros por unidad de superficie y número de granos por verticilastro (Capítulo 4).

II.3. Los mayores rendimientos en chíá se lograron en fechas de siembra donde se maximizó la intercepción de la radiación y la eficiencia en el uso de la misma, generando mayor cantidad de biomasa seca total y partición de la misma a verticilastros y dentro de verticilastros (Capítulo 4).

Para las condiciones ambientales del Valle de Lerma, Salta, Argentina:

II.4. Las mejores condiciones ambientales son las que se generan en fechas de siembra desde fines de enero a mediados de febrero. Fechas de siembras tempranas generaron un crecimiento excesivo de la parte vegetativa produciendo el vuelco del cultivo y penalizando el rendimiento, mientras que fechas de siembra tardías generaron poco crecimiento vegetativo por alcanzar muy rápido el umbral de fotoperíodo para inducir a floración, penalizando el

rendimiento por escaso crecimiento y condiciones ambientales adversas durante el llenado de granos (Capítulos 3 y 4).

III) Conocimiento que confirman hallazgos existentes realizados en distintos ambientes

III.1. Se caracterizó a la chíá como una planta de respuesta fotoperiódica cuantitativa de días cortos (Capítulo 3).

III.2. El genotipo blanco presentó mayor proporción y cantidad del ácido linolénico que linoleico y menor proporción de ácidos grasos poliinsaturados respecto de saturados que el genotipo negro (Capítulo 4).

III.3. Existe una relación lineal negativa entre el porcentaje de proteínas y el porcentaje de aceite en el grano (Capítulo 4).

2) Líneas de investigación futuras

De los resultados encontrados en esta tesis, se desprenden las siguientes posibles líneas de trabajo:

A. La metodología de trabajo utilizada en esta tesis consistió en ensayos a campo con distintas fechas de siembra que modificaron la oferta de fotoperíodo y temperatura durante el ciclo del cultivo. Esta diferente oferta ambiental permitió identificar variaciones en la duración de las sub-fases de pre-floración que modificaron el peso seco de los verticilastros en floración, el cual constituyen un componente temprano asociado al rendimiento. Además, permitió hipotetizar que existe independencia en el efecto de dichas variables ambientales en la duración las sub-fases mencionadas. Una de las propuestas para futuras investigaciones sería llevar a cabo ensayos bajo condiciones controladas de transferencia recíproca (por ejemplo, Bertero et al., 1999) de manera tal de corroborar la independencia de las sub-fases de pre-floración en vistas a su aplicación al mejoramiento genético vegetal.

B. Está bien documentado en la literatura para cultivos mayores, como trigo y cebada, que la dinámica del número de flores y el número de flores fértiles por espiga en floración aumenta significativamente cuando se alargan ciertas sub-fases de pre-floración mediante el manejo de las condiciones termo-fotoperiódicas (Miralles et al., 2000). A su vez, cuando el ambiente fotoperiódico fue modificado para alargar la etapa reproductiva tardía, estos cambios en el número de flores fértiles por espiga en floración se asocian a incrementos en el número de granos a cosecha y rendimiento final del cultivo (Slafer *et al.*, 2001; Gonzalez et al., 2003). No existen estudios en chíá que permitan conocer el efecto del termo-fotoperíodo en la dinámica de generación y mortalidad de flores, y como esto repercute en la generación del número de granos y del rendimiento.

C. En esta tesis se evaluaron los dos genotipos (poblaciones) de chía disponibles en Argentina, que difieren en color de flor y grano: chía con flores y granos blancos, y chía con flores púrpuras y granos mixtos (blanco, beige y marrón grisáceo). Si bien ambos genotipos presentan diferencias marginales en cuanto al rendimiento (la diferencia entre ambos genotipos para el rendimiento fue significativa con un $p \leq 0,1$) y diferencias significativas, pero sutiles, en el perfil lipídico, las mismas no se diferenciaron en aspectos relacionados al desarrollo del cultivo. Esta escasa variabilidad expresada en las variedades comerciales disponibles en Argentina (también reportada en un análisis con mayor cantidad de genotipos de chía a nivel mundial; Cahill et al., 2004) sugiere la necesidad de incrementar la variabilidad genética de este cultivo. La mutagénesis inducida (ya sea física o química) es una herramienta que podrían permitir generar variabilidad genética en el germoplasma domesticado de chía con vistas a su aplicación en mejoramiento genético. En este sentido, ya existen evidencias que demuestran que la chía modifica el tiempo a floración debido a la acción de este tipo de mutágenos (Jamboonsri et al., 2012). Por ello, una interesante línea de trabajo surge de obtener mutantes M₂ (segunda generación después de un tratamiento mutagénico) portadoras de nueva variabilidad genética, que podrán utilizarse para abordar trabajos posteriores de identificación y selección de mutantes con características fisiológicas deseadas, relacionados con los procesos de desarrollo de pre-floración y/o llenado de granos que repercutan en la generación del rendimiento, tanto en cantidad como en calidad.

D. Los resultados obtenidos en esta tesis reportan una primera aproximación en cuanto a cómo los factores medioambientales, sobre todo la temperatura y la radiación, afectan la calidad del grano en chía. Existen numerosos reportes que muestran que las condiciones ambientales (principalmente temperatura y radiación) inciden en la formación de los ácidos grasos de especies oleaginosas. Por ejemplo, en experimentos bajo condiciones controladas en girasol, Izquierdo et al. (2002) concluye que la temperatura mínima nocturna se relaciona con los cambios en el porcentaje de ácido oleico, mostrando una curva sigmoidea que relaciona ambas variables Izquierdo y Aguirrezábal (2008). Al igual que sucede con la temperatura, la radiación acumulada interceptada por el cultivo, además de afectar la síntesis total de aceite (Harwood et al., 1994), afecta su composición lipídica (Izquierdo et al., 2009). Las conclusiones extraídas de esta tesis, sin embargo, se realizaron a partir de ensayos que permitieron explorar un rango muy limitado de condiciones ambientales; por ello, una nueva línea de trabajo surge en testear el efecto de alteraciones significativas de las condiciones de radiación y temperatura bajo condiciones controladas durante el llenado de los granos y observar su incidencia en la calidad de los granos de chía, en especial sobre el perfil lipídico de la misma.

E. Asociados a los experimentos de condiciones controladas propuestos en el punto D, y conociendo que el período crítico para la generación del rendimiento en chíá abarca una amplia ventana desde los 550 °Cd antes de floración a los 250 °Cd posteriores a floración (Diez et al., 2021), se podría pensar que en el llenado del grano el período crítico para la generación del rendimiento coincide, en alguna medida, con el período crítico para la formación de los ácidos grasos. Izquierdo et al. (2006) determinó para girasol que el período crítico para la determinación del porcentaje de ácido oleico se encontraba dentro de la etapa de llenado del grano y la denominó “ventana de sensibilidad”. Observó que la temperatura (principalmente nocturna) durante el periodo entre los 100-300 °Cd desde floración era la que mejor explicaba los cambios en el porcentaje del ácido oleico a cosecha. En canola, el período de mayor sensibilidad asociado a la formación del ácido linolénico se encuentra alrededor de los 730 °Cd después de la floración (Rondanini et al., 2003). Estudios en soja y maíz no encontraron un período de mayor sensibilidad de la composición lipídica a la temperatura (Izquierdo, 2007). Dada la variabilidad en los períodos críticos para la generación de los diferentes ácidos grasos, y debido a que conocer este momento es de crucial importancia para ajustar el manejo de la chíá hacia los momentos donde la oferta medioambiental permita la mejor expresión de ácidos grasos, se podrían realizar experimentos que manipulen las condiciones térmicas durante diferentes momentos del período de llenado de grano con el objetivo de determinar el tipo de respuesta de la composición lipídica a la temperatura (si es sigmoidea como en girasol o lineal como en soja y maíz), e identificar si existe un periodo de mayor sensibilidad de la composición lipídica a la temperatura.

Bibliografía

- Bertero, H. D., King, R. W., Hall, A. J., 1999. Photoperiod-sensitive development phases in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 60, 231-243.
- Cahill, J. P., 2004. Genetic diversity among varieties of chia (*Salvia hispanica* L.). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 51(7), 773-781.
- Diez, J., Anuch Tiranti, J., Sadras, V., Acreche, M., 2021. The critical period for grain yield in chia (*Salvia hispanica*). *Crop and Pasture Science*, In press.
- González, F., Slafer, G., Miralles, D., 2003. Floret development and spike growth as affected by photoperiod during stem elongation in wheat. *Field Crops Research*, 81(1), 29-38.
- Harwood, J., 1994. Environmental effects on plant lipid biochemistry, in the *Lipid Handbook* 2nd edition. Gustone, F. D., Harwood, J. L. y Padley, F. B. (Editores). Chapman y Hall. London. 680 pp.

- Izquierdo, N., Aguirrezábal, L., Andrade, F., Pereyra, V., 2002. Night temperature affects fatty acid composition in sunflower oil depending on the hybrid and the phenological stage. *Field Crops Research*, 77 (2-3), 115-126.
- Izquierdo, N., Aguirrezábal, L., Andrade, F., Cantarero, M. 2006. Modeling the response of fatty acid composition to temperature in a traditional sunflower hybrid. *Agronomy Journal*, 98, 451-461.
- Izquierdo, N., 2007. Factores determinantes de la calidad de aceite en diversas especies. Tesis de Doctor en Producción Vegetal. Curso de Postgrado en Producción Vegetal, UNMdPL. 13 de abril de 2007. 294 pp.
- Izquierdo, N., Aguirrezábal, L., 2008. Genetic variability of the response of fatty acid composition to temperature. *Field Crops Research*, 106, 116-125.
- Izquierdo, N. G., Aguirrezábal, L. A. N., Andrade, F. H., Geroudet, C., Valentinuz, O., Iraola, M. P. 2009. Intercepted solar radiation affects oil fatty acid composition in crop species. *Field Crops Research*, 114(1), 66-74.
- Jamboonsri, W., Phillips, T. D., Geneve, R. L., Cahill, J. P., Hildebrand, D. F., 2012. Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica* L.—a new ω 3 source. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 59, 171-178.
- Kabbaj, A., Vervoort, V., Abbott, A., Tersac, M., Bervillo, A., 1996. Expression of stearate oleate and linoleate desaturase genes in sunflower with normal and high oleic contents. *Helia*, 19, 117.
- Miralles, D., Richards, R., Slafer, G., 2000. Duration of the stem elongation period influences the number of fertile florets in wheat and barley. *Australian Journal of Plant Physiology*, 27, 931-940.
- Rondanini, D; Savin, R., Hall, A., 2003. Dynamics of fruit growth and oil quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) exposed to brief intervals of high temperature during grain filling. *Field Crops Research*, 83, 79-90.
- Slafer, G., Abeledo, L., Miralles, D., Gonzalez, F., Whitechurch, E., 2001. Photoperiod sensitivity during stem elongation as an avenue to raise potential yield in wheat. In *Wheat in a global environment* pp. 487-496. Springer, Dordrecht.