



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**

**RESPUESTA BIOLÓGICA EN EL CRECIMIENTO Y
DESARROLLO DE TOMATE INDUCIDA POR
BRASINOESTEROIDES**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:
MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

ROMY SINAHÍ FONSECA SALVADOR

Bajo la dirección de: **DR. ROGELIO CASTRO BRINDIS**



Chapingo, Estado de México, mayo de 2024

RESPUESTA BIOLÓGICA EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE
TOMATE INDUCIDA POR BRASINOESTEROIDES

Tesis realizada por **ROMY SINAHÍ FONSECA SALVADOR** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA


DIRECTOR: Dr. Rogelio Castro Brindis

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'R' and 'C' with a horizontal line through them, all enclosed within an oval shape.

ASESOR: Dr. Mario Pérez Grajales

A handwritten signature in blue ink, featuring a large, bold, stylized 'M' and 'P' with a horizontal line through them.

ASESOR: Dra. María Teresa Beryl Colinas y León

A handwritten signature in blue ink, written in a cursive style, appearing to read 'María Teresa Beryl Colinas y León'.

Contenido

| | | |
|------|---|----|
| 1. | Introducción general..... | 1 |
| 1.1 | Justificación | 2 |
| 1.2 | Hipótesis..... | 2 |
| 1.3 | Objetivos..... | 2 |
| 2. | Revisión de literatura..... | 3 |
| 2.1 | Origen del cultivo de tomate | 3 |
| 2.2 | Morfología de la planta | 3 |
| 2.3 | Importancia del tomate rojo a nivel mundial | 4 |
| 2.4 | Importancia económica del tomate rojo en México..... | 4 |
| 2.5 | Biorreguladores | 5 |
| 2.6 | Los brasinoesteroides..... | 5 |
| 2.7 | Estructura química de los brasinoesteroides | 5 |
| 2.8 | Biosíntesis de los brasinoesteroides | 6 |
| 2.9 | Efectos fisiológicos de los brasinoesteroides | 6 |
| 2.10 | Literatura citada | 8 |
| 3. | Cambios fisiológicos inducidos por brasinoesteroides en el cultivo de tomate rojo..... | 10 |
| 3.1 | Resumen | 10 |
| 3.2 | Abstract | 11 |
| 3.3 | Introducción | 12 |
| 3.4 | Materiales y métodos..... | 13 |
| 3.5 | Resultados y discusión | 14 |
| 3.6 | Conclusión..... | 22 |
| 3.7 | Literatura citada..... | 23 |
| 4. | La brasinolida interviene en los procesos fisiológicos del cultivo de tomate rojo..... | 25 |
| 4.1 | Resumen | 25 |
| 4.2 | Abstract | 26 |
| 4.3 | Introducción | 27 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.4 | Materiales y métodos..... | 28 |
| 4.5 | Resultados y discusión | 31 |
| 4.6 | Conclusión..... | 48 |
| 4.7 | Literatura citada..... | 49 |
| 5. | Calidad de frutos de jitomate tratados con brasinolida..... | 53 |
| 5.1 | Resumen | 53 |
| 5.2 | Abstract | 54 |
| 5.3 | Introducción | 55 |
| 5.4 | Materiales y métodos..... | 56 |
| 5.5 | Resultados y discusión | 59 |
| 5.6 | Conclusión..... | 64 |
| 5.7 | Literatura citada..... | 65 |

Lista de cuadros

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Altura de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida a los 14, 30, 60 y 90 DDT..... | 15 |
| Cuadro 2. Rendimiento (R), altura (A), área foliar (AF), longitud de raíz (LR) y materia seca de hojas y tallo (MSHT) y materia seca total (MST) plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 16 |
| Cuadro 3. Peso (P), materia seca (MSF), diámetro polar (DP), diámetro ecuatorial (DE) y número de frutos con BER (BER) de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 17 |
| Cuadro 4. Altura de planta (A), área foliar (AF), grosor de tallo (GT), longitud de raíz (LR), rendimiento (R) y número de frutos con BER (BER) de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 40 |
| Cuadro 5. Índice de verdor (IV) y peso específico de hojas (PE) de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 41 |
| Cuadro 6. Materia seca total, hojas, tallo y raíz de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 42 |
| Cuadro 7. Capacidad antioxidante y contenido de fenoles de hojas de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 44 |
| Cuadro 8. Peso de fruto (PF), materia seca (MS), diámetro polar (DP), diámetro ecuatorial (DE) y color (LCh) de frutos procedentes de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 62 |
| Cuadro 9. Capacidad antioxidante (CA), contenido de vitamina C, acidez, firmeza y °Brix de frutos procedentes de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 63 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Estructura química de los brasinoesteroides naturales..... | 6 |
| Figura 2. Ruta de la biosíntesis de brasinoesteroides | 7 |
| Figura 3. Correlación de Pearson de rendimiento vs altura de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 19 |
| Figura 4. Correlación de Pearson de rendimiento vs área foliar de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 20 |
| Figura 5. Correlación de Pearson de rendimiento vs materia seca total de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 20 |
| Figura 6. Correlación de Pearson de rendimiento vs número de frutos con BER de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida. | 21 |
| Figura 7. Correlación de Pearson de rendimiento vs longitud de raíz de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 21 |
| Figura 8. Altura de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 38 |
| Figura 9. Área foliar de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 38 |
| Figura 10. Índice de verdor de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida. | 39 |
| Figura 11. Materia seca total de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 39 |
| Figura 12. Capacidad antioxidante de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 43 |
| Figura 13. Contenido de fenoles de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 43 |
| Figura 14. Correlación de Pearson de rendimiento vs altura de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 45 |
| Figura 15. Correlación de Pearson de rendimiento vs área foliar de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... | 46 |

Figura 16. Correlación de Pearson de rendimiento vs longitud de raíz de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida..... 46

Figura 17. Correlación de Pearson de rendimiento vs número de frutos con BER de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida. 47

DEDICATORIA

A mis padres Evan y Lupita

A mis hermanos Luz, Aby y Felipe

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por brindarme la oportunidad de estudiar la Maestría en Ciencias en Horticultura.

Al Departamento de Fitotecnia por su apoyo para la realización de este estudio.

Al CONAHCYT por su patrocinio para la realización de mis estudios de maestría.

Al Dr. Rogelio Castro Brindis, por dirigir este proyecto y apoyarme con su capacidad y experiencia para poder desarrollar este trabajo.

A mis asesores, el Dr. Mario Pérez Grajales y la Dra. María Teresa Colinas León, quienes contribuyeron con su conocimiento, experiencia y sus recomendaciones para la culminación de esta investigación.

A los laboratoristas, Químico Cecilio Bautista Bañuelos, M.C. Eliza Gaytán Campos y Don Mateo, por su asistencia y contribución durante la fase experimental.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

| | |
|---------------------|------------------------------|
| Nombre | Romy Sinahi Fonseca Salvador |
| Fecha de nacimiento | 28 de febrero de 1996 |
| Lugar de nacimiento | Soconusco, Veracruz |
| CURP | FOSR960228MVZNL02 |
| Profesión | Ingeniera Agroindustrial |
| Cédula profesional | 12629667 |

Desarrollo académico

| | |
|--------------|---|
| Bachillerato | Laboratorista químico Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No. 48 |
| Licenciatura | Ingeniería Agroindustrial Universidad Autónoma Chapingo |

RESUMEN GENERAL

RESPUESTA BIOLÓGICA EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE TOMATE INDUCIDA POR BRASINOESTEROIDES

Debido a que los brasinoesteroides intervienen en diferentes procesos biológicos de las plantas, se realizaron dos estudios en el cultivo de tomate tipo saladette Cid F1 para analizar el efecto del brasinoesteroide brasinolida. En una primera etapa, se aplicó brasinolida de manera foliar en dos frecuencias 15 y 21 días (DA), cuatro concentraciones 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 mg·L⁻¹ y un testigo 0.00 mg·L⁻¹ bajo un DBCA arreglado en parcelas divididas. Se registraron altura (cm), área foliar (cm²), longitud de raíz (cm), materia seca (%), rendimiento (g·planta⁻¹), tamaño de fruto (mm) y número de frutos con “blossom end rot” (BER). Se observó disminución de longitud de raíz y disminución de BER en plantas tratadas con brasinolida. En una segunda etapa, se aplicó brasinolida bajo el mismo diseño experimental, cinco concentraciones 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mg·L⁻¹ y un testigo 0.00 mg·L⁻¹. Se registraron altura (cm), área foliar (cm²), índice de verdor (unidades SPAD), materia seca (%), grosor de tallo (mm), longitud de raíz (cm), peso específico de hojas (g·cm⁻²), capacidad antioxidante (μg·g⁻¹), contenido de fenoles (μg·g⁻¹), rendimiento (g·planta⁻¹) y número de frutos con BER. Se observó incremento en altura, diferencias en área foliar, peso específico, grosor de tallo, disminución de longitud de raíz, incremento de rendimiento y reducción de pérdidas por BER, además de diferencias en capacidad antioxidante y aumento en contenido de fenoles. Para la evaluación de la calidad de los frutos se registraron peso de fruto (g), tamaño (mm), color (LCh), materia seca (%), sólidos solubles (°Brix), firmeza (kg·cm⁻²), acidez titulable (%), capacidad antioxidante (μg·g⁻¹) y contenido de vitamina C (μg·g⁻¹). Las aplicaciones con brasinolida favorecieron las variables analizadas, lo que demuestra que su uso es una opción viable para mejorar la productividad, favorecer la adaptación al estrés ambiental y mejorar las cualidades postcosecha de los frutos de tomate.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., brasinolida, productividad, estrés.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Romy Sinahi Fonseca Salvador

Director de Tesis: Dr. Rogelio Castro Brindis

GENERAL ABSTRACT

BIOLOGICAL RESPONSE ON TOMATO GROWTH AND DEVELOPMENT INDUCED BY BRASSINOSTEROIDS

The purpose of this study was to explore the potential use of the brassinosteroids in horticultural crops as they are involved in several biological processes in plants. Two studies were carried out on the Cid F1 saladette tomato crop. In the first stage, brassinolide was foliar applied at two frequencies 15 and 21 days (DA), four concentrations 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 mg·L⁻¹ and a control 0.00 mg·L⁻¹ in a split-plot randomized complete block design. The variables recorded were height (cm), leaf area (cm²), root length (cm), dry matter (%), yield (g·plant⁻¹), fruit size (mm) and number of fruits with blossom end rot (BER). Root length and BER decreased in plants treated with brassinolide. In a second stage, brassinolide was applied under the same experimental design, five concentrations 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mg·L⁻¹ and a control 0.00 mg·L⁻¹. The variables recorded were height (cm), leaf area (cm²), greenness index (SPAD units), dry matter (%), stem thickness (mm), root length (cm), specific leaf weight (g·cm⁻²), antioxidant capacity (µg·g⁻¹), phenol content (µg·g⁻¹), yield (g·plant⁻¹) and number of BER fruits. Increased height, differences in leaf area, specific weight, stem thickness, decreased root length, increased yield and reduced BER losses were observed, as well as differences in antioxidant capacity and increased phenol content. Fruit quality was evaluated considering the following variables fruit weight (g), size (mm), color (LCh), dry matter (%), soluble solids (°Brix), firmness (kg·cm⁻²), titratable acidity (%), antioxidant capacity (µg·g⁻¹) and vitamin C content (µg·g⁻¹). Application of brassinolide positively favored the variables analyzed. Consequently, brassinolide is a viable option for improving productivity, favoring adaptation to environmental stress and improving the postharvest qualities of tomato fruit.

Key words: *Solanum lycopersicum* L., brassinolide, productivity, stress.

Thesis, Master of Science in Horticulture, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Romy Sinahi Fonseca Salvador
Advisor: Dr. Rogelio Castro Brindis

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El tomate rojo es considerado la hortaliza número uno en exportación en México, el país cuenta con una amplia variedad de frutos de esta especie como redondo (bola), saladette o guajillo, pera, cereza o cherry, además, es un ingrediente básico en la gastronomía mexicana (SADER, 2022).

De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), durante el año 2022 el tomate rojo se produjo en todas las entidades federativas, principalmente en los estados de Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco y Baja California Sur.

Los cambios climatológicos actuales sumado al crecimiento poblacional representan un reto para satisfacer la demanda de alimentos, incluidas las hortalizas (Borjas-Ventura et al., 2020). La mejora del rendimiento y la calidad de los productos agrícolas conlleva la búsqueda de bioproductos que incrementen la productividad a través de sistemas de producción modernos, los cuales enriquezcan la nutrición, controlen plagas y enfermedades, a la vez que promuevan la sostenibilidad y sustentabilidad de los sistemas agrícolas (Hernández & García-Martínez, 2016b).

En este sentido, los brasinoesteroides son biomoléculas que regulan el alargamiento, la división, el desarrollo reproductivo y vascular y las respuestas al estrés, también interactúan con otras hormonas vegetales y/o señales ambientales, pueden inducir la biosíntesis de etileno y afectar el desarrollo de insectos y hongos (Sasse, 1997). La participación de los brasinoesteroides en procesos fisiológicos que propician el desarrollo e interceden en la tolerancia al estrés ambiental señala que los brasinoesteroides y sus análogos podrían incentivar el rendimiento y mejorar la calidad de los productos hortícolas (Hernández & García-Martínez, 2016b).

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la respuesta en el crecimiento y desarrollo del cultivo de tomate inducida por el brasinoesteroide brasinolida, bajo condiciones de invernadero. Con el propósito de generar investigaciones enfocadas en el estudio de compuestos de interés para su aplicación en la producción de cultivos de importancia nacional como el tomate.

1.1 Justificación

El uso de reguladores de crecimiento vegetal con relación a la nutrición de las plantas ha ido en ascenso en la medida que se demuestra que son capaces de promover el crecimiento, la germinación, la fijación de nitrógeno, y la tolerancia al estrés, al mismo tiempo que retrasan la senescencia y la abscisión (Hernández & García-Martínez, 2016b). El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia en México y en el mundo (FAOSTAT, 2019; SADER, 2022; SIAP, 2022), por esta razón, la inversión en insumos agrícolas en este cultivo ha ido en aumento, los productos más utilizados para obtener altos rendimientos son los reguladores del crecimiento de tipo hormonal. Estas sustancias influyen sobre el metabolismo de las plantas, lo que favorece su crecimiento y desarrollo, además, su uso representa una opción para el incremento de la producción agrícola (Borjas-Ventura et al., 2020). Por lo anterior, es necesario realizar estudios que determinen la respuesta fisiológica del uso de reguladores de crecimiento vegetal como los brasinoesteroides en la agricultura, con ello, obtener productos de mejor calidad y menor impacto ambiental.

1.2 Hipótesis

Dado que los brasinoesteroides son biorreguladores que actúan en varios procesos del desarrollo de las plantas, se espera que al menos uno de los tratamientos de brasinolida pueda generar una respuesta favorable en el crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Evaluar la respuesta en el crecimiento y desarrollo del cultivo de tomate, estimulada por la aplicación de brasinolida.

Objetivos específicos

1. Determinar la concentración y frecuencia de aplicación adecuada de brasinolida.
2. Identificar los cambios fisiológicos inducidos por brasinolida en plantas de tomate.
3. Determinar la influencia de brasinolida en la calidad del fruto de tomate.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Origen del cultivo de tomate

El origen del género *Lycopersicon* se localiza en la región andina que se extiende desde el sur de Colombia al norte de Chile, pero fue en México donde se domesticó (Infoagro, 2014). Los españoles y portugueses difundieron el tomate a Oriente Medio y África, y de allí a otros países asiáticos, y de Europa también se difundió a Estados Unidos y Canadá (Infoagro, 2014). Fue introducido por primera vez en Europa a mediados del siglo XVI y se comenzó a cultivar comercialmente a principios del siglo XIX, etapa en que inició la industrialización y diferenciación de las variedades para mesa e industria (Larín et al., 2018).

2.2 Morfología de la planta

Los tomates son plantas dicotiledóneas que se clasifican en dos grupos según la forma en que crecen sus tallos: indeterminadas y determinadas. El tipo de crecimiento de los tallos determina la estructura la planta y afecta la proporción de crecimiento entre los órganos vegetativos y reproductivos, así como la velocidad de desarrollo y maduración de los frutos, el rendimiento y la calidad de la cosecha (Kandel et al., 2020).

La planta de tomate presenta una raíz principal que se extiende verticalmente en el suelo desde donde se ramifican las raíces secundarias y se extienden horizontalmente para absorber agua y nutrientes (Larín et al., 2018).

El tallo es de naturaleza herbácea y está compuesto por nudos y entrenudos. Las hojas son compuestas por folíolos de forma ovada o lanceolada y bordes dentados que se disponen alternativamente a lo largo del tallo (Larín et al., 2018).

Las flores son amarillas, constan de cinco pétalos y suelen autofecundarse; cada flor cuenta con órganos reproductores masculinos y femeninos y se agrupan en racimos denominados inflorescencias, a su vez, la inflorescencia conforma el racimo, una agrupación de frutos alargada y no ramificada (Larín et al., 2018).

El fruto se desarrolla a partir del ovario fecundado después de una polinización exitosa, es una estructura carnosa similar a una baya que varía en tamaño, forma y color según

la variedad, además, suele contener varias cavidades llenas de semillas envueltas en una pulpa gelatinosa (Torres et al., 2023).

Las semillas son pequeñas, aplanadas y en forma de riñón, y están rodeadas por un tejido placentario gelatinoso que las protege y alberga (Torres et al., 2023).

2.3 Importancia del tomate rojo a nivel mundial

El tomate es la hortaliza de mayor importancia en todo el mundo y la de mayor valor económico. Su demanda aumenta continuamente y con ella su cultivo, producción y comercio (InfoAgro, 2019). Según datos mostrados por FAOSTAT, en el año 2019, los principales países productores de tomate a nivel mundial fueron China, India, Turquía, Estados Unidos de América, Egipto, Italia, Irán, España, México y Brasil. China fue el principal país productor de tomate con 26 % de la producción a nivel mundial y generó cerca de 63 millones de toneladas de tomate, seguido de India (8 %), Turquía (5 %), Estados Unidos de América (4 %), Egipto (3 %); Italia, Irán, España, México y Brasil obtuvieron volúmenes de producción semejantes; en conjunto, englobaron el 10 % de la producción mundial de tomate.

2.4 Importancia económica del tomate rojo en México

El jitomate o tomate rojo fue domesticado por los pueblos mesoamericanos hace 2600 años, por eso México tiene una enorme variedad tanto de tamaño como de colores y sabores, algunos ejemplos son: redondo (bola), saladette o guajillo, pera, cereza o cherry, además, por su calidad el país se posiciona como líder mundial en exportación (SADER, 2022).

Según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en el año 2022 el tomate rojo se produjo en todas las entidades federativas, incluso en la Ciudad de México. Los estados productores más importantes son Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco y Baja California sur. En el año 2022, se sembraron 49 000 hectáreas de tomate de las cuales se obtuvieron 3 461 766 toneladas de producto, equivalentes a 31 509 millones de pesos. Sinaloa fue el principal productor con 18.5 % de la producción nacional seguido de San Luis Potosí (12.9 %), Michoacán (9.4 %), Jalisco (5.9 %) y Baja California Sur (5.3 %).

2.5 Biorreguladores

Los biorreguladores vegetales son compuestos bioquímicos que estimulan el crecimiento y la productividad de las plantas cuando se aplican, incluso en pequeñas cantidades (Ratnakumar et al., 2016). Se utilizan ampliamente en la agricultura para aumentar la productividad debido a que modifican los patrones de crecimiento, componentes nutricionales y resistencia a diferentes tipos de estrés, en particular cambios en la temperatura (frío o calor), sequía o inundación, salinidad del suelo y daños causados por plagas y enfermedades (Ratnakumar et al., 2016).

Los principales reguladores del crecimiento vegetal son: las auxinas, giberelinas, citoquininas, ácido abscísico, etileno, además de otros compuestos de reciente estudio como brasinoesteroides y jasmonatos (Asgher et al., 2015).

2.6 Los brasinoesteroides

Los brasinoesteroides son potentes reguladores naturales del crecimiento de las plantas con efectos pleiotrópicos, se encuentran presentes en bajas concentraciones en todas las plantas y son necesarios para su crecimiento y desarrollo normal debido a que afectan la elongación, la división, el desarrollo reproductivo y vascular y las respuestas al estrés, también interactúan con otras hormonas vegetales y/o señales ambientales, modifican la biosíntesis de etileno y pueden afectar el desarrollo de insectos y hongos (Sasse, 1997).

2.7 Estructura química de los brasinoesteroides

Los brasinoesteroides (Figura 1) se definen como esteroides vegetales que tienen un oxígeno en el átomo de carbono C-3 y otros adicionales en C-2, C-6, C-22 y C-23 (Bishop & Yokota, 2001). Las moléculas de los brasinoesteroides cuentan con cuatro anillos y una cadena lateral y se forman a partir de la condensación de bloques de cinco átomos de carbono, denominados isoprenos (Hernández & García-Martínez, 2016a). Los brasinoesteroides con mayor presencia en plantas son los que poseen 28 átomos de carbono con diferentes sustituyentes en dos anillos, así como en la cadena lateral (Hernández & García-Martínez, 2016a). La brasinolida puede sintetizarse directamente del campesterol o a través de la síntesis general de los esteroides (Hernández & García-Martínez, 2016a).

2.8 Biosíntesis de los brasinoesteroides

La ruta biosintética (Figura 2) se puede dividir en dos grandes secciones: de oxidación temprana y ruta de oxidación tardía (Hernández & García-Martínez, 2016a). La primera sección, que abarca la formación de esteroides, es en la que el escualeno se convierte en campesterol, abarca una serie de 13 reacciones bioquímicas; y en la segunda sección el campesterol se convierte en brasinolida en 11 reacciones adicionales (Hernández & García-Martínez, 2016a). Dentro de la ruta biosintética deben producirse ciertos cambios importantes con el fin de obtener moléculas bioactivas, entre estos cambios se incluyen: la formación del grupo oxo en la posición C-6, adición de los grupos hidroxilo en las posiciones C-22 y C-23, formación del sistema diol en los carbonos 2 y 3 del anillo A y la oxidación Baeyer-Villager en el anillo B (Hernández & García-Martínez, 2016a).

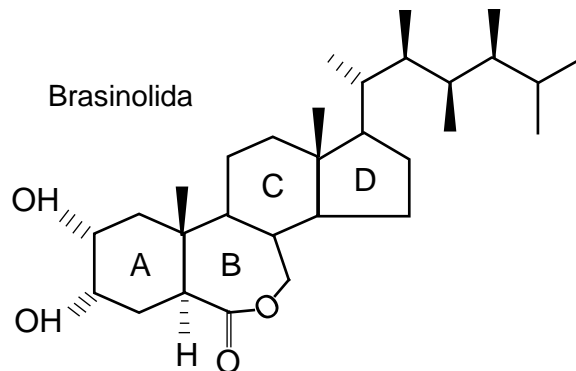


Figura 1. Estructura química de los brasinoesteroides naturales.
Fuente: Modificado con base al esquema de Bishop y Koncz (2002).

2.9 Efectos fisiológicos de los brasinoesteroides

Los brasinoesteroides tienen efectos sobre la elongación, la flexión, la división celular, el desarrollo vascular y reproductivo, la polarización de la membrana y el bombeo de protones, las relaciones fuente/demanda de consumo, tienen un papel importante en la fotomorfogénesis, la inhibición del crecimiento de la raíz, la inducción de la biosíntesis del etileno, el crecimiento del tubo polínico, la senescencia y la modulación del estrés (Clouse & Sasse, 1998).

En *Arabidopsis thaliana* se ha demostrado que los genes sensibles a las auxinas no se regulan adecuadamente cuando se interrumpe la biosíntesis de brasinoesteroides, por lo

tanto, la actividad promotora de crecimiento de la auxina depende de la síntesis de brasinoesteroides (Chung et al., 2011).

Los brasinoesteroides mejoran el alargamiento inducido por auxinas al actuar sinérgicamente con esta hormona. Respecto a lo anterior, en frijol azuki se encontró que la brasinolida aumentó el porcentaje de células con microtúbulos orientados transversalmente, lo que determinó que desempeña un doble papel, similar a la auxina y la giberelina, en la organización de los microtúbulos (Fujioka & Sakurai, 1997).

Por otra parte, los brasinoesteroides provocan la activación de algunas enzimas antioxidantes e inhiben el estrés oxidativo inducido por el estrés de temperatura alta en tomate o el estrés salino en arroz para estimular la tolerancia de las plantas (Reyes et al., 2021). Los análogos espirostánicos de brasinoesteroides protegen a las plantas de tomate y arroz ante condiciones de estrés por temperatura alta o salinidad (Reyes et al., 2021).

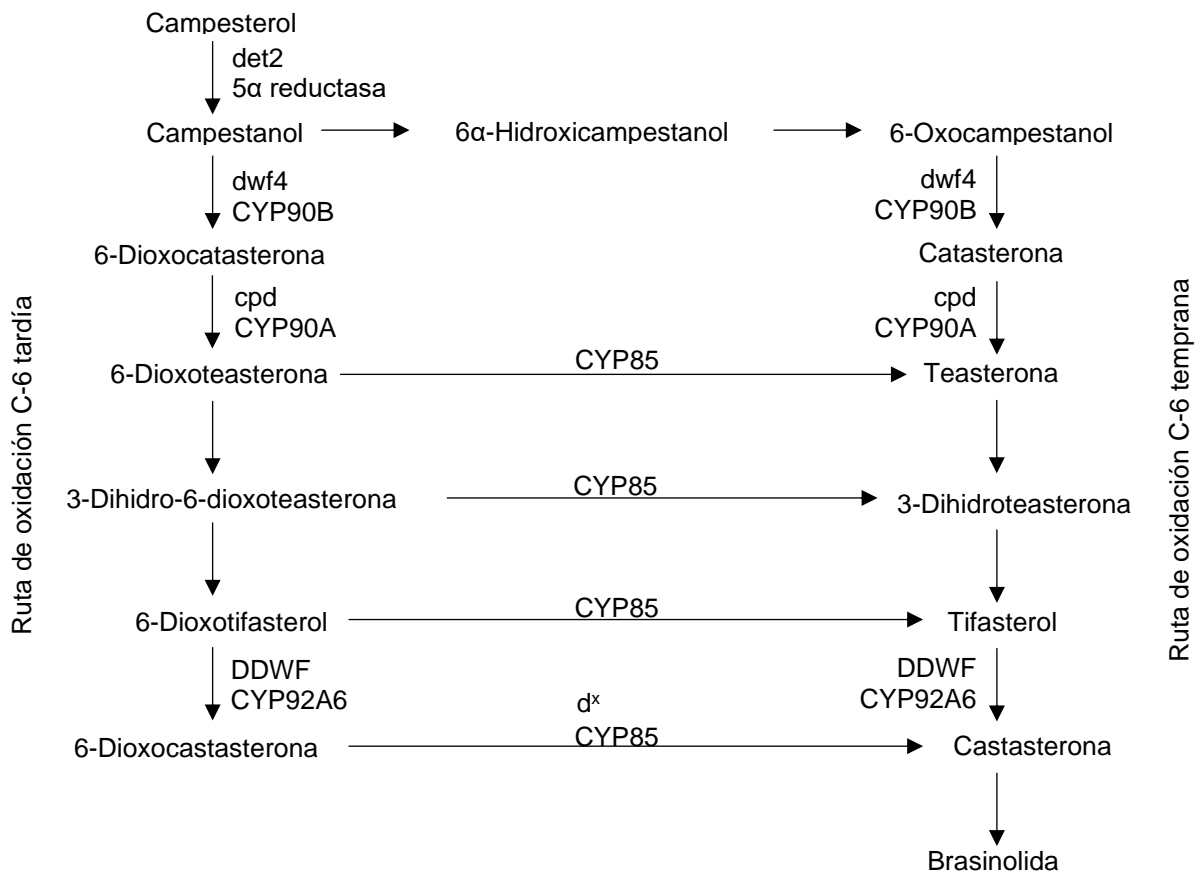


Figura 2. Ruta de la biosíntesis de brasinoesteroides

Fuente: Modificado con base al esquema de Bishop y Koncz (2002).

2.10 Literatura citada

- Asgher, M., Khan, M. I., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2015). Minimising toxicity of cadmium in plants-role of plant growth regulators. *Protoplasma*, 252(2), 399-413. <https://doi.org/10.1007/s00709-014-0710-4>
- Bishop, G. J., & Koncz, C. (2002). Brassinosteroids and plant steroid hormone signaling. *The Plant Cell*, 14(1), 97-110. <https://doi.org/10.1105/tpc.001461>
- Bishop, G., & Yokota, T. (2001). Plants steroid hormones, brassinosteroids: Current highlights of molecular aspects on their synthesis/metabolism, transport, perception and response. *Plant Cell Physiol*, 42(2), 114-120. <https://doi.org/10.1093/pcp/pce018>
- Borjas-Ventura, R., Julca-Otiniano, A., & Alvarado-Huamán, L. (2020). Las fitohormonas una pieza clave en el desarrollo de la agricultura. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 8(2), 150-164. <https://doi.org/10.36610/j.jsab.2020.080200150>
- Chung, Y., Maharjan, P. M., Lee, O., Fujioka, S., Jang, S., Kim, B., Takatsuto, S., Tsujimoto, M., Kim, H., Cho, S., Park, T., Cho, H., Hwang, I., & Choe, S. (2011). Auxin stimulates DWARF4 expression and brassinosteroid biosynthesis in *Arabidopsis*. *The Plant Journal*, 66(4), 564-578. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2011.04513.x>
- Clouse, S., & Sasse, J. (1998). Brassinosteroids: Essential regulators of plant growth and development. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49, 427-451. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.427>
- FAOSTAT. (2019). *Cultivos y productos de ganadería*. Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Fujioka, S., & Sakurai, A. (1997). Brassinosteroids. *Natural Product Reports*, 14(1), 1-10. <https://doi.org/10.1039/NP9971400001>
- Hernández Silva, E., & García-Martínez, I. (2016). Brasinoesteroides en la agricultura. I. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(2), 441-450.
- Hernández Silva, E., & García-Martínez, I. (2016). Brasinoesteroides en la agricultura. II. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(2), 451-462.
- Infoagro. (2014). *El cultivo del tomate*. Revista InfoAgro México. <https://www.infoagro.com/hortalizas/tomate.htm>
- Infoagro. (2019). *Importancia económica del tomate en México*. Revista InfoAgro México. <https://mexico.infoagro.com/importancia-economica-del-tomate-en-mexico/>
- Kandel, D. R., Marconi, T. G., Badillo-Vargas, I. E., Enciso, J., Zapata, S. D., Lazcano, C. A., Crosby K., & Avila, C. A. (2020). Yield and fruit quality of high-tunnel tomato cultivars produced during the off-season in South Texas. *Scientia Horticulturae*, 272, Artículo 109582. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109582>
- Larín, M. A., Díaz, L. A., & Serrano, R. F. (2018). *Cultivo de tomate*. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal "Enrique Álvarez Córdova". <https://centa.gob.sv/download/guia-tecnica-del-cultivo-de-tomate/>

- Ratnakumar, P., Khan, M. R., Minhas, P. S., Farooq, M. A., Sultana, R., Per, T. S., Deokate, P. P., Khan, N. A., Singh, Y., & Rane, J. (2016). Can plant bio-regulators minimize crop productivity losses caused by drought, salinity and heat stress? An integrated review. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 89, 113-125. <https://doi:10.5073/JABFQ.2016.089.014>
- Reyes Guerrero, Y., Núñez Vázquez, M., Mazorra Morales, L. M., Martínez González, L., Ravelo Agüero, E., Amico Rodríguez, J. D., Menéndez Rodríguez, J. L., & Pérez Domínguez, G. (2021). Mecanismos de acción de los brasinoesteroides y sus análogos en las respuestas de plantas sometidas a estrés abióticos. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 11(2).
- SADER. (22 de marzo de 2022). *El jitomate, hortaliza mexicana de importancia mundial*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-jitomate-hortaliza-mexicana-de-importancia-mundial?idiom=es>
- SIAP. (2022). *Panorama agroalimentario 2022*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://drive.google.com/file/d/1FWHntHMgju_uOse_MsOF9jZQDAm_FOD9/view
- Torres Quezada, E., Gandini Taveras, R. J., & Perlaza Cruz, S. (2023). *Basic tomato (Lycopersicon esculentum) physiology and morphology*. Virginia Cooperative Extension. https://www.pubs.ext.vt.edu/content/pubs_ext_vt_edu/en/SPES/spes-508/spes-508.html

3. CAMBIOS FISIOLÓGICOS INDUCIDOS POR BRASINOESTEROIDES EN EL CULTIVO DE TOMATE ROJO

3.1 Resumen

Este estudio se realizó con la finalidad de conocer los cambios en el cultivo de tomate tipo saladette (*Solanum lycopersicum* L.) Cid F1 ocasionados por el regulador del desarrollo conocido como brasinolida en dos frecuencias de aplicación foliar 15 y 21 días (DA) y cuatro concentraciones 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 mg·L⁻¹ y un testigo 0.00 mg·L⁻¹ bajo un diseño experimental en bloques completamente al azar arreglado en parcelas divididas. Se realizaron cuatro aplicaciones foliares para 15 días y tres aplicaciones foliares para 21 días. Se registraron la altura (cm), área foliar (cm²), longitud de raíz (cm), materia seca (%) de tallos, hojas y frutos, rendimiento (g·planta⁻¹), tamaño de fruto (mm) como diámetro polar (DP) y diámetro ecuatorial (DE) y número de frutos con “blossom end rot” (BER). Se observó disminución en longitud de la raíz y disminución del número de frutos con BER en las plantas tratadas con brasinolida, aunque no se encontraron diferencias en el resto de las variables respecto al testigo, este estudio sugiere el uso de brasinoesteroides como una opción viable para mejorar la productividad en jitomate y posiblemente en otros cultivos hortícolas.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., brasinolida, estrés, hortaliza.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Romy Sinahi Fonseca Salvador

Director de Tesis: Dr. Rogelio Castro Brindis

3.2 Abstract

This study was carried out to evaluate the changes in the cultivation of saladette tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Cid F1 caused by the plant growth regulator known as brassinolide in two frequencies of foliar application 15 and 21 days (DA) and four concentrations 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 mg·L⁻¹ and a control 0.00 mg·L⁻¹ in split-plot randomized complete block design. Four foliar applications were made for 15 days and three foliar applications for 21 days. The variables recorded were height (cm), leaf area (cm²), root length (cm), dry matter (%) of stems, leaves and fruits, yield (g·plant⁻¹), fruit size (mm) as polar diameter (PD) and equatorial diameter (ED) and number of fruits with blossom end rot (BER). A decrease in root length and a decrease in the number of fruits with BER was observed in plants treated with brassinolide, although no differences were found in the rest of the variables with respect to the control. This study suggests the use of brassinosteroids as a viable option to improve productivity in horticultural crops.

Key words: *Solanum lycopersicum* L., brassinolide, stress, vegetables.

Thesis, Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Romy Sinahi Fonseca Salvador
Advisor: Dr. Rogelio Castro Brindis

3.3 Introducción

El jitomate o tomate rojo es la hortaliza de mayor importancia en México, se produce en todas las entidades federativas, incluso en la Ciudad de México (SIAP, 2022). Para obtener altos rendimientos se ha recurrido al uso de reguladores del crecimiento vegetal, estas sustancias influyen sobre el metabolismo de las plantas al contribuir a su crecimiento y desarrollo, por lo que su uso representa una alternativa para el incremento de la producción agrícola (Tadeu-Dias, 2019).

Los principales reguladores del crecimiento vegetal son las auxinas, giberelinas, citoquininas, ácido abscísico, etileno, además de brasinoesteroides y jasmonatos (Rademacher, 2015). Los brasinoesteroides (BR) son hormonas esteroides vegetales que desempeñan funciones cruciales en diversos aspectos de la biología vegetal, incluida alargamiento celular, la división celular, el crecimiento de raíces, la fotomorfogénesis, la diferenciación estomática y vascular, la germinación de semillas, la inmunidad, la reproducción, la síntesis de etileno, la senescencia y la tolerancia al estrés biótico y abiótico como la congelación, la sequía, la salinidad, las enfermedades, el calor y la deficiencia de nutrientes (Ashraf et al., 2010; Clouse & Sasse, 1998; Gudesblat & Russinova, 2011). El efecto pleiotrópico de la acción de los BR en la fisiología de las plantas se debe a la activación de conjuntos de factores de transcripción que actúan directamente sobre los reguladores transcripcionales activados por BR, es decir, BZR1 y BES1, que a su vez regulan subconjuntos de genes en una respuesta específica, tales como alargamiento celular, floración, senescencia y morfogénesis de la hoja (Clouse, 2011). Hay un gran número de análogos de BR y los más estables son la epibrasinólida, la homobrasinólida y la brasinólida, los BR no son tóxicos y son ecológicos, se han utilizado para mejorar la productividad y calidad de algunas plantas de importancia hortícola, por ejemplo, tomate, mango, fresa, lichi, pasiflora, uvas y sandía (Ali, 2017). La regulación de una amplia gama de procesos en el desarrollo de las plantas y las respuestas al estrés ambiental, han señalado que los BR y sus análogos podrían incrementar sustancialmente el rendimiento y calidad de cultivos hortícolas, por lo tanto, es necesario realizar estudios que determinen la influencia del uso de estos reguladores del desarrollo en la agricultura, y así posibilitar el uso de insumos agrícolas eficientes y de bajo impacto ambiental.

3.4 Materiales y métodos

Para conocer los cambios en el cultivo de tomate rojo ocasionados por brasinoesteroides, se utilizó el regulador del desarrollo brasinolida (BL) (0.01 % SL presentación original), en dos frecuencias de aplicación foliar 15 y 21 días (DA), y cuatro concentraciones 0.01, 0.05, 0.10, 0.15 mg·L⁻¹ y un testigo 0.00 mg·L⁻¹, de las cuales se realizaron cuatro aplicaciones para 15 días y tres aplicaciones para 21 días. Bajo un diseño experimental en bloques completamente al azar arreglado en parcelas divididas, para ello, se establecieron cuatro bloques, y en cada uno 60 plantas de jitomate tipo saladette (*Solanum lycopersicum* L.) Cid F1, híbrido de hábito de crecimiento indeterminado.

El experimento se estableció en el área de invernaderos en el campo agrícola experimental del Departamento de Fitotecnia (CAEF) en la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, del 24 de mayo (fecha de siembra) al 05 de diciembre de 2022 (última cosecha).

La separación entre planta fue de 0.3 m, aproximadamente 3.0 plantas·m⁻², se utilizó arenilla de tezontle en contenedores de polietileno negro tipo bolsa de 40 x 40 calibre 600. Las plantas fueron conducidas mediante poda a un tallo y el ápice de crecimiento fue eliminado en el momento en que la planta tenía seis racimos de fruto. Para cubrir los requerimientos nutricionales del cultivo se aplicó solución nutritiva Steiner al 100 % con 180 ppm de Ca²⁺ conductividad eléctrica de 2.0 y pH de 5.5, a partir del tercer racimo se aumentó el contenido de Ca²⁺ a 250 ppm, debido a la aparición de “blossom end rot” (BER) en los frutos. Se consideró como muestra una planta seleccionada aleatoriamente por cada tratamiento en cada bloque.

Se registraron la altura (cm), área foliar (cm²), longitud de raíz (cm), materia seca (%) de tallos, hojas y frutos, rendimiento (g·planta⁻¹), tamaño de fruto (mm) como diámetro polar (DP) y diámetro ecuatorial (DE) y número de frutos con “blossom end rot” (BER).

La variable altura (cm) se midió a los 14, 30, 60 y 90 días después del trasplante, previo al despunte de las plantas. Para la determinación del área foliar (cm²) se utilizó la fórmula:

$$AF = 0.34 \times (L \times A) - 9.31$$

donde AF es el área foliar (cm²), A el ancho máximo y L el largo de la hoja (cm), respectivamente (Astegiano et al., 2001).

La longitud de raíz (cm) fue el largo alcanzado al final de la cosecha. El peso seco (g) de tallos, hojas y frutos se determinó en estufa a una temperatura de 70 °C hasta alcanzar peso constante (Velasco et al., 2016). El porcentaje de materia seca se calculó mediante la fórmula:

$$MS (\%) = \frac{PS}{PH} \times 100$$

donde MS es el porcentaje de materia, PS es el peso seco (g) y PH es el peso húmedo (g) de cada estructura.

El peso de fruto (g) se registró mediante balanza digital. El tamaño (mm) se midió con un vernier digital como diámetro polar y diámetro ecuatorial. El conteo de frutos con BER fue el total durante la cosecha. El rendimiento se consideró como los gramos (g) de tomate producidos por planta.

Se realizó el análisis estadístico en el programa SAS Studio, para un arreglo de tratamientos en parcelas divididas en bloques completamente al azar. Con los datos obtenidos se hizo análisis de varianza para cada variable y una prueba de separación de medias con el método de Tukey ($\alpha=0.05$), así como un análisis de correlación de Pearson de las variables altura de planta, longitud de raíz y número de frutos con BER respecto al rendimiento, este coeficiente se interpretó de acuerdo al ejemplo propuesto por Schober et al. (2018) donde los valores absolutos de r correspondientes a 0.00-0.10 indican correlación insignificante, 0.10-0.39 correlación débil, 0.40-0.69 correlación moderada, 0.70-0.89 correlación fuerte y 0.90-1.00 correlación muy fuerte.

3.5 Resultados y discusión

El crecimiento de las plantas de tomate fue constante en todos los tratamientos hasta los 90 días después del trasplante (DDT), aproximadamente un mes después de la cuarta y tercera aplicación de BL, según el tratamiento. No se encontraron diferencias en la comparación de medias en ninguna de las etapas de desarrollo, en el tratamiento 0.15 mg·L⁻¹ 15 DA se obtuvo la mayor altura con 195.25 cm (Cuadro 1), en comparación

con los demás tratamientos, con la misma concentración, pero 21 DA se obtuvieron plantas con una altura de 191.50 cm, es decir, 12 y 10 % más altas que el testigo, esto señala que en general, existe aumento en la altura de las plantas estimulada por la aplicación de BL.

Similar a lo encontrado en el híbrido de tomate F1 Arka Rakshak en el cual, la aplicación de homobrasinolida (HBR) incrementó la altura de planta significativamente (Sridhara et al., 2021), se observaron concordancias en la respuesta de las plantas a la aplicación exógena de brasinoesteroides y sus análogos. Es importante recalcar, que los tratamientos en este estudio no incrementaron la altura significativamente de acuerdo con la comparación de medias, por lo que la aplicación de la BL no modificó el crecimiento del cultivo.

Cuadro 1. Altura de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida a los 14, 30, 60 y 90 DDT.

| Tratamiento | | Altura (cm) | | | |
|-------------|------|-------------|---------|----------|----------|
| F | C | 14 DDT | 30 DDT | 60 DDT | 90 DDT |
| 15 | - | 27.33 a | 60.48 a | 142.85 a | 182.58 a |
| 21 | - | 29.68 a | 62.08 a | 146.95 a | 180.33 a |
| DMSH | | 4.02 | 6.26 | 7.14 | 2.85 |
| 15 | 0.00 | 29.38 a | 60.88 a | 140.25 a | 173.88 a |
| | 0.01 | 27.75 a | 64.25 a | 141.50 a | 181.00 a |
| | 0.05 | 29.75 a | 62.75 a | 150.25 a | 179.75 a |
| | 0.10 | 24.25 a | 55.50 a | 136.00 a | 183.00 a |
| | 0.15 | 25.50 a | 59.00 a | 146.25 a | 195.25 a |
| 21 | 0.00 | 29.38 a | 60.88 a | 140.25 a | 173.88 a |
| | 0.01 | 27.25 a | 63.00 a | 142.25 a | 169.25 a |
| | 0.05 | 30.25 a | 60.75 a | 152.25 a | 191.25 a |
| | 0.10 | 31.50 a | 59.75 a | 146.75 a | 175.75 a |
| | 0.15 | 30.00 a | 66.00 a | 153.25 a | 191.50 a |
| DMSH | | 9.91 | 19.57 | 21.86 | 47.84 |
| CVf % | | 14.02 | 10.15 | 4.89 | 1.56 |
| CVc % | | 13.04 | 11.98 | 5.64 | 9.54 |

DMSH: Diferencia Mínima Significativa Honesta; F: Frecuencia; C: Concentración; DDT: Días después del trasplante; CVf: Coeficiente de variación para frecuencia; CVc: Coeficiente de variación para concentración; Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Por lo que respecta a las variables rendimiento, área foliar y materia seca de hojas y tallo no presentaron diferencias significativas (Cuadro 2), sin embargo, los tratamientos con BL tienden a presentar valores más altos en rendimiento que el testigo.

En cuanto a la longitud de la raíz, la aplicación de la BL tuvo efecto inhibitorio en el crecimiento, estadísticamente todas las concentraciones (excepto en 0.05 mg·L⁻¹) presentaron menor longitud de raíz respecto al testigo. 0.15 mg·L⁻¹ obtuvo una longitud de raíz de 32.50 cm, equivalente a una reducción del 24 % en comparación con el testigo, el cual presentó una longitud de raíz de 42.63 cm.

Cuadro 2. Rendimiento (R), altura (A), área foliar (AF), longitud de raíz (LR) y materia seca de hojas y tallo (MSHT) y materia seca total (MST) plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida.

| T | R (g) | A (cm) | AF (cm ²) | LR (cm) | MSHT (%) | MST (%) |
|-------|-----------|----------|-----------------------|----------|----------|---------|
| F | | | | | | |
| 15 | 3838.45 a | 182.58 a | 13525 a | 34.68 a | 15.01 a | 7.98 a |
| 21 | 3422.79 a | 180.33 a | 13786 a | 36.84 a | 14.99 a | 8.52 a |
| DMSH | 1002.2 | 2.85 | 866.72 | 5.75 | 1.60 | 2.23 |
| C | | | | | | |
| 0.00 | 3254.38 a | 173.88 a | 13978 a | 42.63 a | 15.22 a | 8.10 a |
| 0.01 | 3707.86 a | 175.13 a | 12997 a | 32.64 b | 14.86 a | 7.66 a |
| 0.05 | 3811.88 a | 185.50 a | 13943 a | 37.13 ab | 14.25 a | 8.27 a |
| 0.10 | 3630.38 a | 179.38 a | 13862 a | 33.38 b | 14.34 a | 8.83 a |
| 0.15 | 3784.25 a | 193.38 a | 13396 a | 32.50 b | 16.32 a | 8.28 a |
| DMSH | 1036.2 | 25.49 | 2122.40 | 8.80 | 2.55 | 2.17 |
| FxC | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| CVf % | 27.02 | 1.56 | 6.23 | 15.83 | 10.46 | 26.53 |
| CVc % | 19.00 | 9.54 | 10.38 | 16.47 | 11.33 | 17.55 |

DMSH: Diferencia Mínima Significativa Honesta; T: Tratamiento; F: Frecuencia; C: Concentración; FxC: Interacción Frecuencia x Concentración; NS: No significativo; CVf: Coeficiente de variación para frecuencia; CVc: Coeficiente de variación para concentración; Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey, p≤0.05).

De manera similar, la aplicación exógena de 24-epibrasinólida (epiBL) en plántulas de *Arabidopsis* estimuló significativamente el alargamiento de la raíz cuando fue aplicada en concentraciones pequeñas a 0.0001 µM, mientras que a niveles más altos la longitud de la raíz disminuyó 23 % y 37 % después de la exposición a 0.01 µM y 0.10 µM de epiBL, respectivamente (Wu et al., 2019). De esta forma, se acentúa que los efectos promotores

e inhibidores de los BR en el tamaño del meristemo de la raíz dependen en gran medida de la concentración hormonal y la ubicación de su acción (Wei & Li, 2016).

En este aspecto, se ha encontrado que la expresión de BRI1 en las células no pilosas inhibe el alargamiento de las células de la raíz debido a que aumenta la expresión de genes relacionados con la síntesis de etileno en una ruta que implica BES1/BZR2, lo que resulta en un aumento de etileno y posterior acumulación de celulosa cristalina en la pared celular de las células no pilosas, que afecta la expansión celular unidireccional, la elongación celular y, por lo tanto, inhibe la elongación de la raíz (Fridman et al., 2014).

Aunque se registró una reducción del tamaño de la raíz, el rendimiento no disminuyó, por el contrario, si bien no se encontraron diferencias significativas, las plantas tratadas con BL incrementaron su rendimiento hasta 17 % respecto al testigo.

Referente a la calidad de fruto, no existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (Cuadro 3), no obstante, los tratamientos con BL presentaron valores más altos que el testigo.

Cuadro 3. Peso (P), materia seca (MSF), diámetro polar (DP), diámetro ecuatorial (DE) y número de frutos con BER (BER) de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida.

| T | P (g) | MSF (%) | DP (mm) | DE (mm) | BER |
|-------|----------|---------|---------|---------|---------|
| F | | | | | |
| 15 | 110.69 a | 6.12 a | 67.10 a | 55.52 a | 4.00 a |
| 21 | 110.42 a | 6.53 a | 67.62 a | 54.96 a | 5.79 a |
| DMSH | 5.89 | 1.80 | 1.31 | 1.84 | 4.22 |
| C | | | | | |
| 0.00 | 103.69 a | 5.55 a | 65.82 a | 53.80 a | 8.38 a |
| 0.01 | 110.76 a | 5.86 a | 68.40 a | 54.48 a | 4.86 ab |
| 0.05 | 113.58 a | 6.75 a | 65.91 a | 56.44 a | 4.00 ab |
| 0.10 | 117.96 a | 7.25 a | 69.54 a | 56.50 a | 4.13 ab |
| 0.15 | 106.83 a | 6.14 a | 67.23 a | 54.93 a | 3.00 b |
| DMSH | 17.77 | 1.70 | 4.86 a | 3.74 | 4.39 |
| FxC | NS | NS | NS | NS | NS |
| CVf % | 5.23 | 28.14 | 1.91 | 3.27 | 85.03 |
| CVc % | 10.72 | 18.04 | 4.82 | 4.51 | 60.12 |

DMSH: Diferencia Mínima Significativa Honesta; T: Tratamiento; F: Frecuencia; C: Concentración; FxC: Interacción Frecuencia x Concentración; NS: No significativo; CVf: Coeficiente de variación para frecuencia; CVc: Coeficiente de variación para concentración; Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

En cuanto al “blossom end rot” (BER), la aplicación de BL en la concentración más alta ($0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) redujo de manera significativa el número de frutos con BER, 5.38 frutos menos que el testigo, lo que implicó una reducción de pérdidas del 64 %. BER es una afección fisiológica relacionada con la movilidad del Ca^{2+} hacia los órganos de demanda de la planta, puesto que la función fisiológica de Ca^{2+} se realiza a través del control de canales de la membrana celular mediado por el intercambiador osmótico Ca^{2+} , Ca^{2+} -ATPasa y $\text{Ca}^{2+}/\text{H}^{+}$ (Straltsova et al., 2015). La disminución de la productividad del tomate rojo por BER se debe a que el calcio se mueve principalmente a través del xilema y, en consecuencia, la concentración en el fruto puede verse influida por la eliminación del agua en el suelo, la temperatura, el déficit de presión de vapor atmosférico y la actividad fotosintética (Hagassou et al., 2019).

Congruente con este estudio, en frutos de tomate de híbrido BRS Montese la aplicación de epiBL ($0.01 \mu\text{M}$) inhibió el desarrollo de BER, mantuvo un mayor contenido de Ca^{2+} soluble y menor contenido de Ca^{2+} unido a la pared celular en el tejido de la fruta, lo que redujo la susceptibilidad de la fruta a BER (Riboldi et al., 2019). Aunado a lo anterior, en plantas de fresa tratadas con análogos de brasinoesteroides, BB16 ($0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y EP24 ($0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) se encontró mayor acumulación de calcio intracelular en hojas de plantas aplicadas con BR en comparación con plantas no tratadas (Furio et al., 2020).

Por otra parte, la frecuencia de aplicación no influyó en ninguna de las variables analizadas, pues los tratamientos 15 DA y 21 DA no tuvieron diferencias significativas, esto representó más ahorro económico y mejor aprovechamiento de productos comerciales que contengan BL, ya que con menos aplicaciones se obtienen resultados similares.

Correlaciones

La comparación del rendimiento respecto a las variables altura, área foliar, materia seca total, longitud de raíz y número de frutos con BER, determinaron correlaciones moderadas para el rendimiento en contraste con la altura, materia seca y el número de frutos con BER (Figuras 3, 5 y 6), con valor de r de 0.44, -0.59 y -0.46, respectivamente.

Estas relaciones señalaron que el rendimiento fue favorecido por la altura y menor número de frutos afectados con BER, además la relación inversa entre el rendimiento y materia seca total indicó que la disminución del valor de esta variable por efecto de BL no influyó negativamente sobre los gramos de frutos producidos por planta, en cambio, el rendimiento se vio favorecido.

La correlación débil entre el rendimiento respecto al área foliar y la longitud de raíz (Figura 4 y 7) presentó valores de r de 0.28 y 0.29, pese a disminuir el tamaño de la raíz, los tratamientos con BL no afectaron el rendimiento, por el contrario, aunque no hubo una diferencia entre los tratamientos, todos obtuvieron un rendimiento más alto en comparación con el testigo.

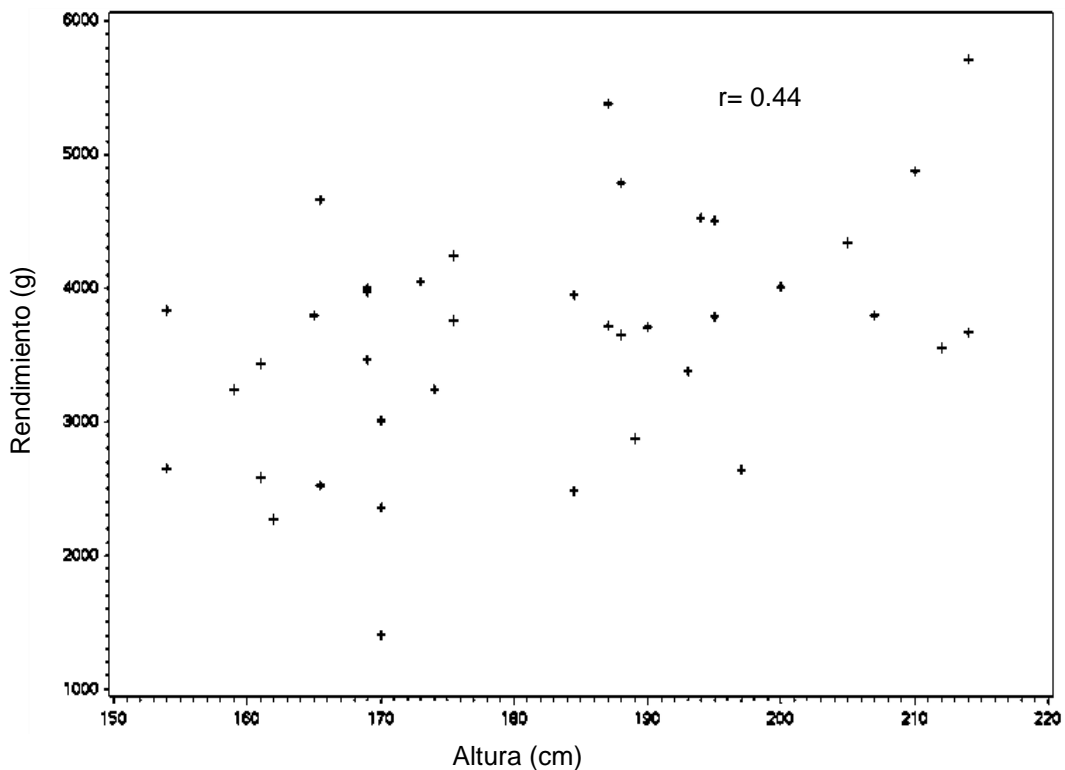


Figura 3. Correlación de Pearson de rendimiento vs altura de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida.

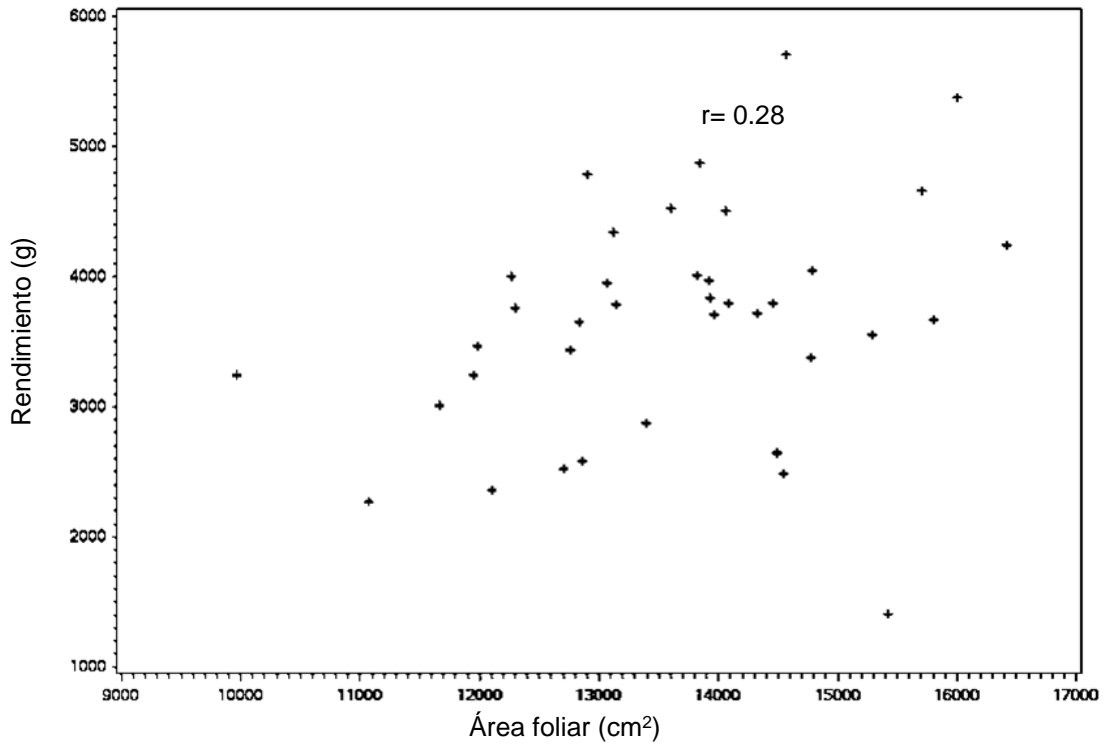


Figura 4. Correlación de Pearson de rendimiento vs área foliar de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida.

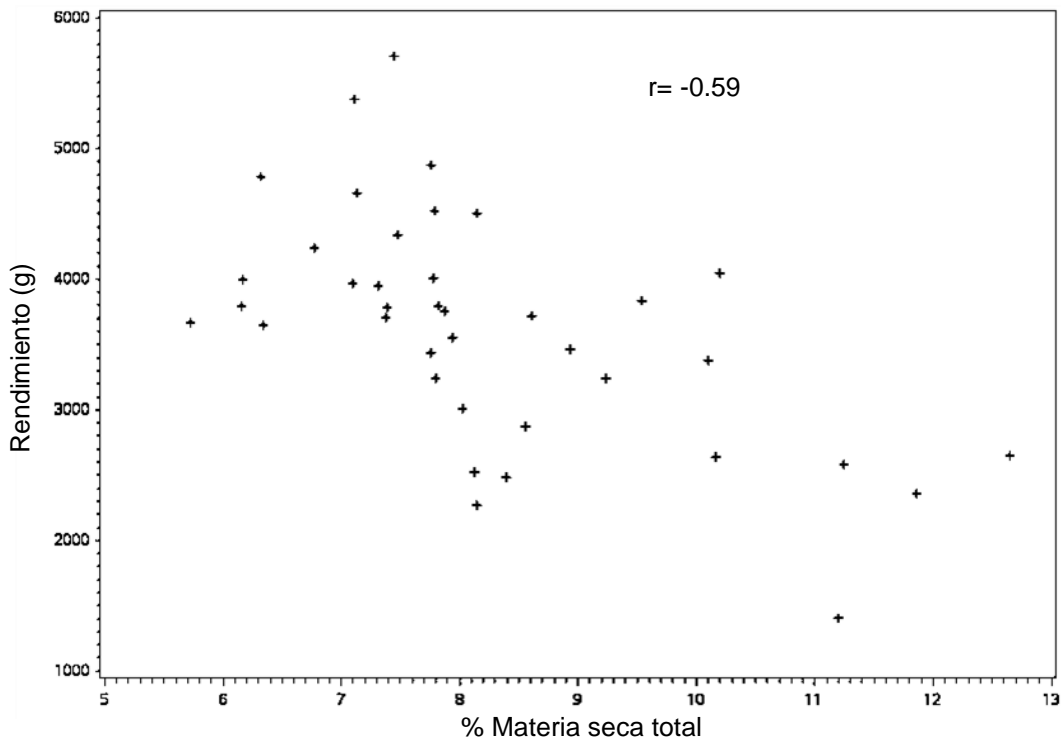


Figura 5. Correlación de Pearson de rendimiento vs materia seca total de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida.

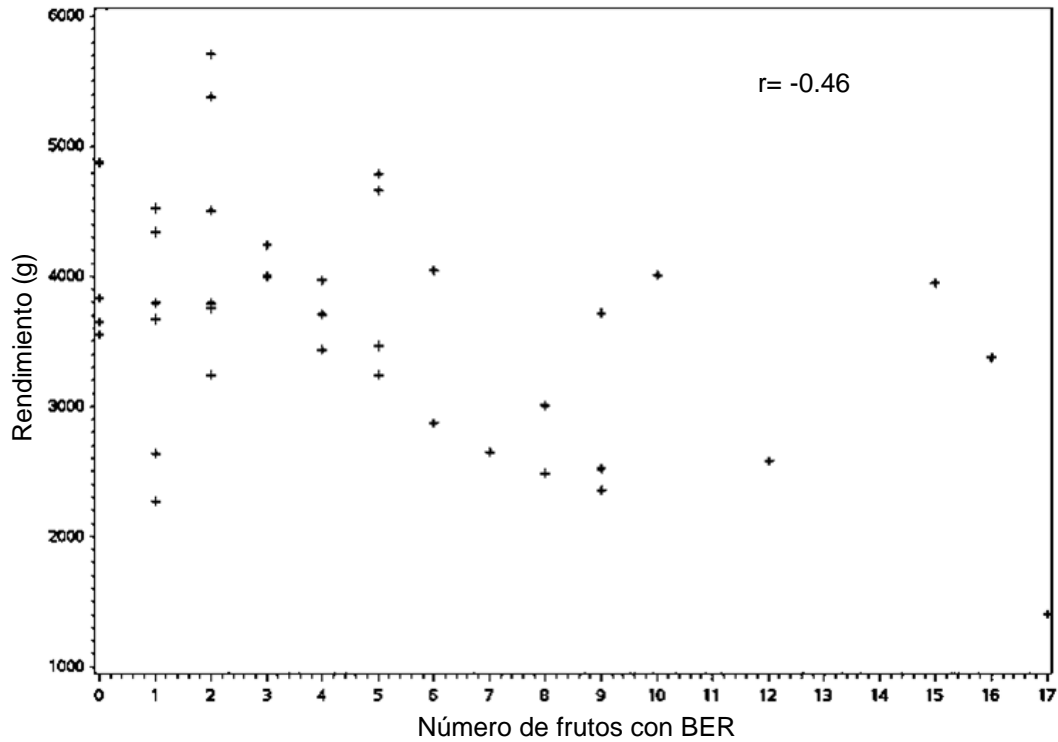


Figura 6. Correlación de Pearson de rendimiento vs número de frutos con BER de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida.

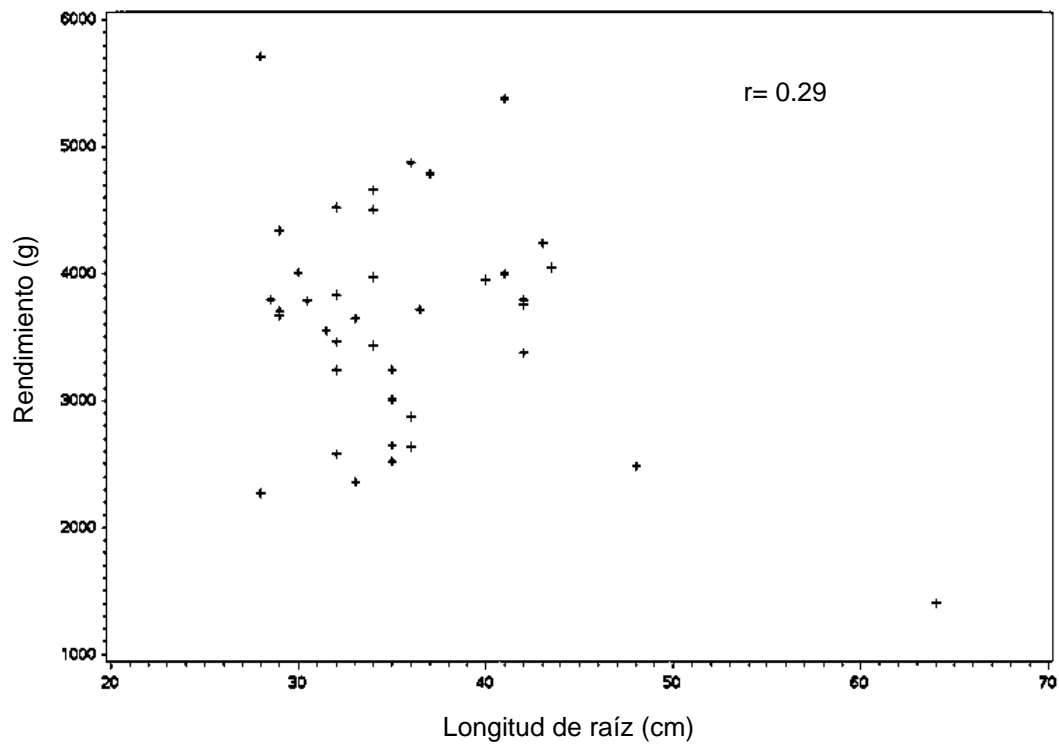


Figura 7. Correlación de Pearson de rendimiento vs longitud de raíz de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida.

3.6 Conclusión

En este estudio se encontró decrecimiento de la longitud de la raíz por acción de BL también se obtuvo disminución en el número de frutos afectados con BER, uno de los principales problemas fisiológicos que afectan al cultivo de jitomate. El uso de brasinoesteroides en la agricultura puede ser una opción viable para mejorar el rendimiento, por ende, los estudios respecto al funcionamiento de este grupo de hormonas en cultivos agrícolas deben enfocarse en la determinación de la concentración y etapa de aplicación idóneas, la optimización de procesos para la síntesis de estos compuestos, el efecto sobre el crecimiento de la raíz, la interacción con otras hormonas y los mecanismos de acción de los genes involucrados en su actividad biológica.

3.7 Literatura citada

- Ali, B. (2017). Practical applications of brassinosteroids in horticulture-Some field perspectives. *Scientia Horticulturae*, 225, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.06.051>
- Ashraf, M., Akram, N., Arteca, R., & Foolad, M. (2010). The physiological, biochemical and molecular roles of brassinosteroids and salicylic acid in plant processes and salt tolerance. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 29(3), 162-190. <https://doi.org/10.1080/07352689.2010.483580>
- Astegiano, E., Favaro, J., & Bouzo, C. (2001). Estimación del área foliar en distintos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) utilizando medidas foliares lineales. *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales*, 16(2), 249-256.
- Clouse, S. (2011). Brassinosteroid signal transduction: From receptor kinase activation to transcriptional networks regulating plant development. *The Plant Cell*, 23(4), 1219-1230. <https://doi.org/10.1105/tpc.111.084475>
- Clouse, S., & Sasse, J. (1998). Brassinosteroids: Essential regulators of plant growth and development. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49, 427-451. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.427>
- Fridman, Y., Elkouby, L., Holland, N., Vragovic, K., Elbaum, R., & Savaldi-Goldstein, S. (2014). Root growth is modulated by differential hormonal sensitivity in neighboring cells. *Genes & Development*, 28(8), 912-920. <https://doi.org/10.1101/gad.239335.114>
- Furio, R. N., Martínez-Zamora, G. M., Salazar, S. M., Coll, Y., Perato, S. M., Martos, G. G., & Díaz Ricci, J. C. (2020). Role of calcium in the defense response induced by brassinosteroids in strawberry plants. *Scientia Horticulturae*, 261, Artículo 109010. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109010>
- Gudesblat, G. E., & Russinova, E. (2011). Plants grow on brassinosteroids. *Current Opinion in Plant Biology*, 14(5), 530-537. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2011.05.004>
- Hagassou, D., Francia, E., Ronga, D., & Buti, M. (2019). Blossom end-rot in tomato (*Solanum lycopersicum* L.): A multi-disciplinary overview of inducing factors and control strategies. *Scientia Horticulturae*, 249, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.042>
- Rademacher, W. (2015). Plant growth regulators: Backgrounds and uses in plant production. *Journal of Plant Growth Regulation*, 34(4), 845-872. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9541-6>
- Riboldi, L. B., Gaziola, S. A., Azevedo, R. A., de Freitas, S. T., & de Camargo e Castro, P. R. (2019). 24-Epibrassinolide mechanisms regulating blossom-end rot development in tomato fruit. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38, 812-823. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9892-x>

- Schober, P., Bóer, C., & Schwarte, L. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- SIAP. (2022). *Panorama agroalimentario 2022*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://drive.google.com/file/d/1FWHntHMgju_uOse_MsOF9jZQDAm_FOD9/view
- Sridhara, S., Ramesh, N., Gopakkali, P., Paramesh, V., Tamam, N., Abdelbacki, A., Elansary, H. O., El-Sabrou, A. M., & Abdelmohsen, S. (2021). Application of homobrassinolide enhances growth, yield and quality of tomato. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(8), 4800-4806. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.05.008>
- Straltsova, D., Chykun, P., Subramaniam, S., Sosan, A., Kolbanov, D., Sokolik, A., & Demidchik, V. (2015). Cation channels are involved in brassinosteroid signalling in higher plants. *Steroids*, 97, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2014.10.008>
- Tadeu-Dias, J. P. (2019). Plant growth regulators in horticulture: practices and perspectives. *Bioteconología Vegetal*, 19(1), 3-14.
- Velasco Alvarado, M. J., Castro Brindis, R., Castillo González, A. M., Avitia García, E., Sahagún Castellanos, J., & Lobato Ortiz, R. (2016). Composición mineral, biomasa y rendimiento en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) injertado. *Interciencia*, 41(10), 703-708.
- Wei, Z., & Li, J. (2016). Brassinosteroids regulate root growth, development, and symbiosis. *Molecular Plant*, 9(1), 86-100. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2015.12.003>
- Wu, C., Li, F., Xu, H., Zeng, W., Yu, R., Wu, X., Shen, L., Liu, Y., & Li, J. (2019). The potential role of brassinosteroids (BRs) in alleviating antimony (Sb) stress in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 141, 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.05.011>

4. LA BRASINOLIDA INTERVIENE EN LOS PROCESOS FISIOLÓGICOS DEL CULTIVO DE TOMATE ROJO

4.1 Resumen

El cambio climático y el calentamiento global influyen negativamente en la eficiencia de los procesos fisiológicos. En este estudio se aplicó brasinolida de manera foliar en tomate CID F1 en dos frecuencias 15 y 21 días (DA), cinco concentraciones 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mg·L⁻¹ y un testigo 0.00 mg·L⁻¹, con el objetivo de mejorar la productividad del cultivo de tomate. Se registraron altura de planta (cm), área foliar (cm²), índice de verdor (unidades SPAD), materia seca (%), grosor de tallo (mm), longitud de raíz (cm), peso específico de hojas (g·cm⁻²), capacidad antioxidante de hojas (μg·g⁻¹), contenido de fenoles (μg·g⁻¹), rendimiento (g·planta⁻¹) y número de frutos con “blossom end rot” (BER). Se observó que 0.15 mg·L⁻¹ incrementó la altura de planta 17.57 % respecto al testigo. 0.05 y 0.10 mg·L⁻¹ 15 DA y 0.25 mg·L⁻¹ 21 DA en conjunto con el testigo tuvieron mayor área foliar. No se presentaron diferencias estadísticas significativas en el índice de verdor. El testigo y 0.15 mg·L⁻¹, tuvieron mayor peso específico, 8.09 x10⁻³ y 7.99 x10⁻³ g·cm⁻², la aplicación de 0.20 mg·L⁻¹ generó 14.85 % más grosor de tallo que el testigo. Con 0.25 mg·L⁻¹ se presentó menos longitud de raíz con 37 cm, es decir, 18.97 % menos que el testigo, esa misma concentración produjo 7880.83 g, 20 % más de rendimiento y 66 % menos pérdidas por BER que el testigo. Los tratamientos a los 21 DA tuvieron 1.4 % más capacidad antioxidante que con 15 DA. El contenido de fenoles más alto se obtuvo con la concentración 0.05 mg·L⁻¹ con 332.42 μg·g⁻¹, 28 % más respecto al testigo. El estrés ambiental es una problemática difícil de manejar en condiciones de campo e invernadero, no obstante, la aplicación foliar de brasinolida permitió obtener mejores rendimientos.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., rendimiento, cultivo, temperatura.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Romy Sinahi Fonseca Salvador

Director de Tesis: Dr. Rogelio Castro Brindis

4.2 Abstract

Climate change and global warming negatively influence the efficiency of physiological processes. In this study, brassinolide was foliar applied to tomato CID F1 at two frequencies 15 and 21 days (DA), five concentrations 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mg·L⁻¹ and a control 0.00 mg·L⁻¹, the objective was to improve the productivity. The variables recorded were plant height (cm), leaf area (cm²), greenness index (SPAD units), dry matter (%), stem thickness (mm), root length (cm), leaf specific weight (g·cm⁻²), antioxidant capacity (μg·g⁻¹) and phenol content (μg·g⁻¹) of leaves, yield (g·plant⁻¹) and number of fruits with blossom end rot (BER). It was observed that 0.15 mg·L⁻¹ increased its height by 17.57 % respect to the control. 0.05 and 0.10 mg·L⁻¹ 15 DA and 0.25 mg·L⁻¹ 21 DA together with the control had greater leaf area. There were no significant statistical differences in the greenness index. The leaves of the control and in the 0.15 mg·L⁻¹, treatment showed higher specific weight, 8.09 x10⁻³ and 7.99 x10⁻³ g·cm⁻², respectively. 0.20 mg·L⁻¹ had 14.85 % more stem thickness than the control. 0.25 mg·L⁻¹ had less root length with 37 cm, 18.97 % less than the control, the same concentration produced 7880.83 g, 20 % more yield and 66 % less losses per BER than the control. The 21 DA treatments had 1.4 % more antioxidant capacity than 15 DA. 0.05 mg·L⁻¹ obtained the highest phenol content with 332.42 μg·g⁻¹, 28 % more than the control. Environmental stress is a difficult problem to manage in field and greenhouse conditions; however, the foliar application of brassinolide allowed optimum yields.

Key words: *Solanum lycopersicum* L., yield, crop, temperature.

Thesis, Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Romy Sinahi Fonseca Salvador
Advisor: Dr. Rogelio Castro Brindis

4.3 Introducción

En México, la producción de hortalizas es una actividad de alta importancia económica, el país se destaca como uno de los principales productores y exportadores de tomate rojo a nivel mundial debido a las condiciones agroclimáticas que permiten su cultivo. Sin embargo, la persistente sequía y el aumento de eventos climáticos extremos como huracanes y tormentas, amenaza su producción e incrementa los costos (GCMA, 2024). Adicionalmente, el incremento en la temperatura impacta el desarrollo y la capacidad reproductiva de las plantas, lo que ocasiona significativas disminuciones en la productividad (Ayankojo & Morgan, 2020).

El crecimiento y desarrollo de las plantas está controlado en gran medida por sustancias químicas denominadas reguladores del crecimiento vegetal (PGR) (Tadeu-Dias, 2019). Las células en crecimiento por acción de las hormonas expresan división y alargamiento celular, lo cual promueve el desarrollo vegetal (Soni et al., 2022). Por lo tanto, es necesario que su aplicación se ajuste a las particularidades y etapas fisiológicas de cada especie vegetal (Soni et al., 2022). La creciente necesidad mundial de alimentos requiere incorporar nuevas tecnologías para obtener una mayor producción del cultivo, así la aplicación de PGR es una opción técnica para optimizar la producción de diversas plantas hortícolas en vivero, campo e invernadero (Tadeu-Dias, 2019).

Los brasinoesteroides (BR) son hormonas esteroides polihidroxiladas que intervienen en aspectos como la diferenciación del sistema vascular, la división y alargamiento celular y la determinación del sexo (Chung & Choe, 2013). Este grupo importante de hormonas vegetales participa en la regulación del crecimiento y desarrollo de las plantas, lo que favorece la adaptación a diversos ambientes, tanto en condiciones normales como en condiciones de estrés ambiental (Planas-Riverola et al., 2019) incluida temperatura (calor, frío y congelación), agua (sequía), salinidad, metales pesados, luz (intensa y débil) y radiación (UV-A/B) (Irfan et al., 2017; Vardhini & Anjum, 2015). Los BR como la brasinolida (BL) tienen impacto en la fotosíntesis, ya que mejoran la tasa de asimilación de carbono de las hojas mediante el aumento del contenido de clorofila, que es la biomolécula recolectora de luz de la fotosíntesis de las plantas (Hu et al., 2013; Mumtaz et al., 2020). Se han identificado a partir de plantas más de 70 fitoesteroides relacionados

con BL, cuya estructura es similar a las hormonas reproductivas de los animales, como los estrógenos, andrógenos y progestágenos, así como a las hormonas presentes en la corteza suprarrenal, como los glucocorticoides y mineralocorticoides (Zhao & Li, 2012).

En la actualidad, el cambio climático y el calentamiento global influyen negativamente en la eficiencia de los procesos fisiológicos, por otra parte, el crecimiento descontrolado de la población humana señala un desafío para satisfacer la demanda de alimentos y mejorar la calidad de los productos agrícolas. La aplicación externa de reguladores del crecimiento vegetal como BL contribuyen en la mejora de cultivos hortícolas de importancia económica como el tomate, principalmente, por su participación en la adaptación a diversos estreses abióticos. Debido, al impacto resultante de la aplicación de BL en una primera fase exploratoria, este estudio encontró los elementos subyacentes involucrados en la respuesta a la aplicación foliar de BL en el cultivo de tomate rojo con el objetivo de implementarlo en la mejora de la productividad de los cultivos hortícolas.

4.4 Materiales y métodos

En un diseño experimental en bloques completamente al azar con arreglo de los tratamientos en parcelas divididas, se aplicó de manera foliar brasinolida (0.01 % SL presentación original) en dos frecuencias, 15 y 21 días (DA) y cinco concentraciones 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mg·L⁻¹ y un testigo 0.00 mg·L⁻¹. Se realizaron un total de seis aplicaciones para 15 DA y cuatro aplicaciones para 21 DA. Se establecieron tres bloques y en cada uno 132 plantas de tomate tipo saladette (*Solanum lycopersicum* L.) Cid F1. El experimento se estableció en el área de invernaderos en el campo agrícola experimental del Departamento de Fitotecnia (CAEF) en la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México. Durante el desarrollo del cultivo se monitoreó la temperatura dentro del invernadero mediante HOB0 MX2301A, las temperaturas máximas registradas variaron de 41-36 °C y las mínimas de 10-2 °C durante los meses de junio a noviembre. Cada unidad experimental se colocó a 0.3 m de separación entre planta, aproximadamente, 3.0 plantas·m⁻², se utilizó arenilla de tezontle en contenedores de polietileno negro tipo bolsa de 40 x 40 calibre 600. Para cubrir con los requerimientos nutricionales del cultivo se aplicó solución nutritiva Steiner con conductividad eléctrica de 2.0 y pH de 5.5. Las plantas se condujeron mediante poda a un tallo y se despuntaron

hasta alcanzar ocho racimos de fruto. Las variables que se registraron fueron altura de planta (cm), área foliar (cm²), índice de verdor (unidades SPAD), materia seca (%), las cuales se midieron a los 30, 60 y 90 días. El grosor de tallo (mm), longitud de raíz (cm) y peso específico de hojas (g·cm⁻²) a los 90 días. La capacidad antioxidante de hojas (μg·g⁻¹) y el contenido de fenoles (μg·g⁻¹) a los 45 y 90 días. El rendimiento (g·planta⁻¹) y número de frutos con “blossom end rot” (BER) se registraron durante la cosecha.

La altura (cm) se consideró desde la base del tallo hasta el ápice de la planta, para obtener el área foliar (cm²) se utilizó un medidor de área foliar LI-3100.

El índice de verdor (unidades SPAD) se midió mediante un medidor de clorofila SPAD (Minolta 502) en la hoja más recientemente madura (HMRM) (Fertilab, 2021).

El peso seco (g) de tallos, hojas y raíz se obtuvo en estufa a 70 °C hasta peso constante (Velasco et al., 2016), el porcentaje de materia seca se calculó mediante la fórmula:

$$MS (\%) = \frac{PS}{PH} \times 100$$

donde MS es el porcentaje de materia, PS es el peso seco (g) y PH es el peso húmedo (g) de cada estructura.

El grosor de tallo (mm) se midió de la parte central de cada planta muestreada, la longitud de raíz (cm) se determinó como el largo total de cada raíz después de ser extraídas y lavadas para retirar el sustrato.

El peso específico de hojas se calculó como:

$$PE = \frac{PSh}{AF}$$

donde PE es el peso específico (g·cm⁻²), PSh es el peso seco de hojas (g) y AF su área foliar (cm²). El rendimiento se consideró como la cantidad de tomate comercial producidos por planta muestreada dentro de la parcela útil, expresada en gramos, y el conteo de frutos con BER fue el total durante la cosecha.

La capacidad antioxidante (μg·g⁻¹) se determinó mediante el método ABTS (Ozgen et al., 2006), para ello, se homogeneizaron 0.1 g de hojas (HMRM) en 5 mL de alcohol etílico

al 70 % y se dejaron reposar durante 24 h, del extracto se tomó 100 µL para añadirles 3.9 mL de ABTS en solución reguladora acetato (pH 4.5), se dejó reposar durante 2 h en oscuridad; posteriormente, se leyó en espectrofotómetro a 734 nm. De la curva patrón con trolox se obtuvo la siguiente ecuación de regresión lineal:

$$y = 0.63875 + (-0.03227)(x)$$

de la cual se determinó la fórmula para el cálculo de concentración de capacidad antioxidante:

$$CA = \frac{(y + 0.63875)(V)(1)}{(0.03227)(A)(Ph)}$$

donde CA es la capacidad antioxidante ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), y es la absorbancia (nm), V es el volumen total del extracto (mL), A es la alícuota (mL), Ph es el peso de hoja (g).

El contenido de fenoles ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) se determinó mediante el método Folin (Waterman & Mole, 1994), para lo cual, se tomaron 100 µL del extracto alcohólico anterior, se agregaron 3.9 mL de agua destilada y 0.25 mL de folin después de 9 min en reposo se añadió 0.75 mL de Na_2CO_3 al 20 % y se dejó reposar en oscuridad durante 2 h; posteriormente, se leyó en espectrofotómetro a 760 nm. De la curva patrón con ácido tánico se obtuvo la siguiente ecuación de regresión lineal:

$$y = 0.201(x) + 0.0049$$

de la cual se determinó la fórmula para el cálculo del contenido de fenoles:

$$CF = \frac{(y - 0.0049)(V)(1)}{(0.201)(A)(Ph)}$$

donde CF es el contenido de fenoles ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), y es la absorbancia (nm), V es el volumen total del extracto (mL), A es la alícuota (mL), Ph es el peso de hoja (g).

Se realizó análisis estadístico en el programa SAS Studio, se utilizó la codificación para un arreglo en parcelas divididas completamente al azar. Con los datos obtenidos se hizo análisis de varianza para cada variable y una prueba de separación de medias con el método de Tukey ($\alpha=0.05$), así como un análisis de correlación de Pearson de las variables altura, área foliar, longitud de raíz y número de frutos con BER respecto al

rendimiento, este coeficiente se interpretó de acuerdo al ejemplo propuesto por Schober et al. (2018) donde los valores absolutos de r correspondientes a 0.00–0.10 indican correlación insignificante, 0.10–0.39 correlación débil, 0.40–0.69 correlación moderada, 0.70–0.89 correlación fuerte y 0.90–1.00 correlación muy fuerte.

4.5 Resultados y discusión

Los datos de altura a los 30 días después del trasplante (DDT), señalaron que las plantas presentan diferencias significativas en crecimiento (Figura 8) desde la primera aplicación, con la concentración más alta, $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, se tuvo una altura de 81.16 cm, lo que corresponde a 7.14 % más de crecimiento respecto al testigo, cuya altura fue 75.75 cm. A los 60 DDT, las plantas en las que se aplicó $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ presentaron mayor crecimiento que los demás tratamientos y fueron 7.03 % más altas que el testigo, cuya altura fue de 161 cm. Esa misma concentración mantuvo mayor crecimiento a los 90 días (Cuadro 4) con 17.57 % más altura en comparación con el testigo. En general, las plantas 15 DA crecieron 4.17 % más que las plantas 21 DA. Asimismo, se observó que a 15 DA las concentraciones más bajas (0.05 , 0.10 y $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) alcanzaron mayor altura a los 90 DDT. En este contexto, la aplicación exógena de BR en dos genotipos de tomate (BR-deficientes y BR-eficientes) con dos niveles de brasinoesteroides (BR 0 y 100 nM) reveló que BR promovió una mejora en el crecimiento de las plantas (Ferreira et al., 2018), similar a lo observado en este estudio. Lo anterior sugiere que el incremento en altura es atribuido a los procesos de división celular (producción) y expansión celular (elongación), los cuales son los principales factores que controlan el crecimiento de los órganos de las plantas. Por consiguiente, BR interviene en los procesos de crecimiento celular debido a que la expansión celular determina cuánto crecerá un determinado órgano, pero el número de células que se alargan en un tejido está determinado por las tasas de división celular (Nolan et al., 2020).

En relación con el área foliar, a los 30 días, la concentración $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ generó 3268.38 cm^2 (Figura 9), 23.56 % más área foliar que el testigo que produjo 2645.01 cm^2 . La misma concentración a los 60 días conservó mayor área foliar con 46.74 % más que el testigo. En general, a los 90 DDT, las plantas 15 DA tuvieron 281 cm^2 más que las plantas 21 DA, 1.92 % más área foliar (Cuadro 4). Respecto a la interacción entre factores

de estudio, la mayor cantidad de área foliar se obtuvo con 0.05 y 0.10 mg·L⁻¹ 15 DA y 0.25 mg·L⁻¹ 21 DA en conjunto con el testigo. 0.20 mg·L⁻¹ 21 DA fue la que generó menor área con 12 971.77 cm² correspondiente a 14.66 % menos que el testigo. En relación con el área foliar, se observó en semillas de frijol asperjadas con Biobras-16® (0.05 mg·L⁻¹) un estímulo del crecimiento de la parte aérea, la concentración de carbohidratos solubles de las hojas, la materia seca de la parte aérea y el área foliar (Martínez et al., 2018). Por otra parte, la BL aplicada exógenamente (0.2 μM) en *Arabidopsis thaliana* (L.) aumentó tanto el número como el tamaño de las células foliares en mutantes del gen de-etiolated-2 (det2) (causante del desarrollo de hojas pequeñas), al restaurar la morfología macroscópica de las hojas atrofiadas, se dedujo que los BR están involucrados en la expansión de las células y participan en la proliferación de células en la lámina foliar (Nakaya et al., 2002).

En general, se observó disminución del índice de verdor en el testigo y en los tratamientos (Figura 10) conforme aumentó la edad de las plantas y el número de aplicaciones de BL, aunque no se presentan diferencias estadísticas significativas. Las plantas aplicadas con 0.05 mg·L⁻¹ 15 DA obtuvieron 2.1 unidades SPAD más que el testigo mientras que con la concentración 0.25 mg·L⁻¹ 15 DA se obtuvo 5.4 unidades SPAD menos que el testigo (Cuadro 5). Debido a que el índice de verdor es proporcional a la cantidad de clorofila en la hoja (Hurtado et al., 2017), se puede relacionar a la BL aplicada en baja concentración con el aumento de los pigmentos fotosintéticos. Por tanto, el aumento de los pigmentos fotosintéticos sugiere que el papel de BR está relacionado con la ruta de biosíntesis de la clorofila y el mantenimiento de la integridad del cloroplasto (Ferreira et al., 2018). De igual manera, en una investigación realizada en tomate con el mutante altered brassinolide sensitivity1 (abs1) se encontró una disminución del área foliar y de la biomasa asociada a una reducción sustancial de la vascularización y del tamaño de las células epidérmicas. En ese sentido, el mutante abs1 mostró una disminución significativa de la acumulación de clorofila, esto demuestra que la reducción transcripcional de la señalización de BR perjudica la síntesis de clorofila, la captación cuántica de fotones y la transferencia de energía luminosa, lo que conduce a una disminución de la capacidad fotosintética (Mumtaz et al., 2020).

Con relación a la materia seca, a los 30 días la concentración $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ favoreció el porcentaje de materia seca total con 12.26 %, 24.84 % más que el testigo, el cual generó 9.82 % (Figura 11). A los 60 días, la concentración $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ resultó en mayor porcentaje de materia seca total con 12.44 %, por el contrario, $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ generó menor porcentaje con 11.27 %. A los 90 días, se observó que las concentraciones con mayor materia seca total fueron 0.15 y $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, con 13.65 y 13.58 % respectivamente, en cambio, el menor porcentaje se obtuvo con $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (12.66 %). En general, el porcentaje de materia seca de hojas fue mayor en los tratamientos 21 DA que a los 15 DA (Cuadro 6). El contenido de materia seca del tallo fue mayor en las aplicaciones 0.15 y $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con 16.11 y 16.08 % respectivamente, en comparación con 15.82 % del testigo. Por otra parte, $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 15 DA con 14.35 % fue el porcentaje más bajo, equivalentes a 1.46 % menos que el testigo. En cuanto a la raíz, en los tratamientos 21 DA se obtuvo mayor cantidad de materia seca que a los 15 DA, los demás tratamientos no presentaron diferencias significativas.

Referente al grosor del tallo, la concentración $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ obtuvo mayor grosor con 15.46 mm (Cuadro 4), equivalente a 14.85 % más que el testigo, el cual tuvo 13.46 mm, el resto de los tratamientos mostraron un grosor de tallo similar al testigo.

El incremento en altura y biomasa por acción de BR se ha detectado en otros tipos de plantas como *Lemus chinensis* donde la aplicación de BL ($2 \times 10^{-4} \text{ mM}$) aumentó la capacidad de carboxilación fotosintética y la tasa de asimilación de CO_2 también mejoró la densidad de plantas, altura y biomasa (Hu et al., 2013). De igual manera, en *Arabidopsis thaliana* tratada con 2,4-epibrasinolida (epiBL) a $5 \mu\text{M}$, se detectó que BR regula diferentes conjuntos de expresión de genes de la celulosa sintasa (CESA), lo que controla el crecimiento primario como secundario en diferentes etapas de desarrollo, además, la señal de BR promovió la acumulación de biomasa aérea debido a que durante la síntesis primaria de la pared celular, el complejo celulosa sintasa (CSC) sintetiza microfibras de celulosa esenciales para el agrandamiento y alargamiento celular (Xie et al., 2011). Por ende, en este estudio la señalización de BR favoreció el alargamiento celular, el crecimiento de los órganos vegetales y posterior acumulación de biomasa aérea en plantas tratadas con BL.

Por otra parte, en peso específico las concentraciones 0.05 y 0.20 mg·L⁻¹ presentaron menor valor con 7.49×10^{-3} g·cm⁻² respecto a los demás tratamientos mientras que la interacción 0.15 mg·L⁻¹ 21 DA obtuvo mayor contenido con 8.26×10^{-3} (Cuadro 5). Un referente de la distribución de fotosintatos en los órganos de las plantas es la relación entre la biomasa seca y el área foliar. Debido a lo cual, se ha determinado en cultivos como pepino que la distribución de la biomasa entre los órganos de la planta afecta la producción total, el peso de los frutos individuales y su calidad, por lo tanto, el reparto de la biomasa entre el crecimiento de los frutos y los órganos vegetativos se relacionó con el equilibrio de los asimilados para las diferentes partes de la planta ocasionado por la demanda (Peil & López-Gálvez, 2002).

En longitud de raíz, los tratamientos 21 DA fueron 2.22 cm más largos que a 15 DA. La concentración 0.25 mg·L⁻¹ obtuvo 18.97 % menos longitud que el testigo cuya longitud fue 45.67 cm (Cuadro 4). Se observó mayor reducción de longitud de la raíz en 0.25 mg·L⁻¹ 15 DA con 33.33 cm, esa misma concentración a 21 DA generó más crecimiento con 40.67 cm, equivalentes a 22 % más. Lo anterior se explica porque la pared celular se compone de una matriz compleja de polisacáridos que incluye microfibrillas de celulosa, las cuales forman tanto estructuras cristalinas como cadenas de celulosa de organización amorfa (Fridman et al., 2014). Cuando el receptor brassinosteroid insensitive1 (BRI1) se dirige a un subconjunto de células epidérmicas llamadas células no ciliadas inhibe la expansión celular unidireccional de las células vecinas y el crecimiento de toda la raíz (Fridman et al., 2014).

De manera que, el equilibrio espacio temporal entre el mantenimiento, la proliferación y la diferenciación de las células madre determina la tasa de crecimiento de las raíces (Chaiwanon & Wang, 2015). Por lo que, los niveles altos y bajos de brassinazole resistant1 (BZR1) son necesarios para el comportamiento celular normal en la zona de elongación y el centro quiescente (QC) (Chaiwanon & Wang, 2015). BZR1 activa principalmente sus genes diana expresados en la zona de transición-alargamiento, pero reprime genes en el QC y las células madre circundantes (Chaiwanon & Wang, 2015). Consecuentemente, BR y auxina interactúan antagónicamente en las raíces para

controlar el equilibrio espaciotemporal de la dinámica de las células madre requerido para un crecimiento óptimo de las raíces (Chaiwanon & Wang, 2015).

En adición a lo anterior, BR también actúa en condiciones de luz azul reducida ya que BZR1/BZR2 modifican los niveles de expresión de los genes que codifican la xiloglucano endotransglicosilasa/hidrolasa (enzima asociada a la extensibilidad de la pared celular), lo cual regula el alargamiento del hipocótilo y el crecimiento celular, sinérgicamente con la auxina (Keuskamp et al., 2011; Nolan et al., 2020; Sun et al., 2010).

En cuanto al rendimiento, la mayoría de las concentraciones produjeron una cantidad de frutos comerciales superior al testigo, excepto la concentración $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, con la cual se obtuvo un rendimiento similar al testigo. La concentración $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ generó 7880.83 g correspondientes a 20 % más que el testigo. En general, los tratamientos 15 DA fueron 285.28 g más productivos que 21 DA, 3.81 % más frutos comerciales por planta. El incremento en el rendimiento se atribuyó a que el efecto de la señal BZR1 mejoró la actividad del ciclo de Calvin y la capacidad fotosintética, por consiguiente, al acumularse en forma desfosforilada, BZR1 indujo un aumento en la transcripción de genes clave en el ciclo de Calvin (FBA1, RCA1, FBP5 y PGK1), lo que incrementó el rendimiento del cultivo (Yin et al., 2022). Dicho aumento en rendimiento, también se ha registrado en cultivos como la fresa donde la aplicación foliar de epiBL ($3 \mu\text{M}$) favoreció el crecimiento vegetativo, incrementó el rendimiento y mejoró la calidad del fruto (Ali et al., 2022).

Asimismo, el incremento en la eficiencia productiva se vio beneficiado por una reducción en la incidencia de frutos con BER, debido a que las plantas aplicadas con BL disminuyeron en todas las concentraciones las pérdidas causadas por esta afección en todas las concentraciones, así $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ logró reducir 66 % menos pérdidas por BER en comparación con el testigo. Es importante resaltar que el calcio Ca^{2+} es un macronutriente vital que se mueve dentro de las plantas mediante el proceso de transpiración. Como consecuencia de esto, los lapsos breves de carencia de calcio tienen un impacto inmediato en los tejidos en desarrollo y en la producción de frutos, lo que se traduce en pérdidas económicas (Malone et al., 2002).

Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que BER incidió sobre todo en frutos de plantas no tratadas, no obstante, los síntomas de deficiencia se observan en hojas jóvenes en expansión o en tejidos alimentados principalmente por el floema en lugar del xilema debido a que Ca^{2+} no puede movilizarse desde los tejidos más viejos y redistribuirse a través del floema, los tejidos en proceso de desarrollo requieren una disponibilidad inmediata de Ca^{2+} a través del sistema vascular de la planta, que está influenciado por la transpiración, la cual es menos activa en las hojas jóvenes, en los tejidos cerrados y en los frutos (White & Broadley, 2003).

Adicionalmente, la productividad del cultivo se ve afectada por las condiciones ambientales, se ha informado que la temperatura óptima para el desarrollo del tomate oscila entre 20 y 30 °C durante el día y entre 14 y 17 °C durante la noche; temperaturas superiores a los 30-35 °C afectan la fructificación por mal desarrollo de óvulos, el desarrollo de la planta y del sistema radicular además temperaturas superiores a 25 °C e inferiores a 12 °C ocasionan que la fecundación sea defectuosa o nula en variedades e híbridos muy sensibles a este factor (Jasso et al., 2012). Durante la implementación de este experimento, la variación de temperatura máxima 41-36 °C y mínima de 10-2 °C pudo provocar estrés en las plantas de tomate y ocasionar defectos fisiológicos como el BER, además, las altas temperaturas pudieron afectar la viabilidad del polen al ocasionar complicaciones en la productividad de plantas no tratadas con BL. Con relación a esto, se encontró que la producción de especies reactivas del oxígeno (ROS) dependiente de BZR1 desempeña un papel fundamental en el desarrollo del polen y las semillas de plantas de tomate, ya que la regulación mediada por BR desencadena la muerte celular programada y la degradación de las células tapetales (Yan et al., 2020). El estrés ambiental es una problemática difícil de manejar en condiciones campo e invernadero, sin embargo, la aplicación foliar de BL permitió obtener rendimientos óptimos (incluso superiores al testigo).

Al igual que la temperatura extrema, el efecto del estrés abiótico por salinidad, sequía, alta intensidad de luz y nutrición con amoníaco, resulta en un aumento de ROS, es decir, un alto estrés oxidativo que ocasiona la muerte celular y produce una desintegración de la membrana plasmática y del tonoplasto, al igual que una ruptura del retículo

endoplásmico, por lo que precede a la fuga de iones, incluida la fuga de Ca^{2+} , y la pérdida de turgencia (Saure, 2014). Precisamente, la aparición de BER se debe en parte a la interacción entre la homeostasis de Ca^{2+} y la acumulación de ROS, lo cual desempeña un papel fundamental en el desarrollo del trastorno al afectar la estabilidad de la membrana y las propiedades de la pared celular (Topcu et al., 2022).

La capacidad bioestimulante de BR sobre los efectos del estrés térmico e hídrico se observó en plantas de tomate procedentes de semillas tratadas con solución BB-6 ($0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Después una suspensión del riego, las plantas tratadas con BR presentaron un estado hídrico foliar ligeramente más favorable, una menor reducción de la altura y del diámetro del tallo. Igualmente, en condiciones de alta temperatura ($40 \text{ }^\circ\text{C}$), tanto el brasinoesteroide natural epiBL (0.001 y $0.005 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) como el análogo sintético MH-5 (0.001 y $0.005 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) estimularon la actividad de enzimas antioxidantes (peroxidasa, catalasa y superóxido dismutasa) (Mazorra & Núñez, 2003). El efecto antiestresante de BR también se demostró en plantas de tomate tratadas con epiBL ($1 \text{ }\mu\text{M}$) expuestas a $45 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 3 h, las plantas tratadas resultaron más tolerantes a las altas temperaturas que las plantas no tratadas, además tuvieron una mejor eficiencia fotosintética y aumentaron la producción de fruta tanto en condiciones normales ($25/20 \text{ }^\circ\text{C}$) como de estrés térmico ($35/27 \text{ }^\circ\text{C}$) (Singh & Shono, 2005).

Referente a la capacidad antioxidante, a los 45 días las concentraciones 0.15 y $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ obtuvieron $17\ 148$ y $16\ 977.00 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente, 10.86 y 9.75% más capacidad antioxidante que el testigo. En cuestión de interacción, $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 15 DA obtuvo el valor más alto con $17\ 684.83 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, mientras que 0.05 y $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 21 DA obtuvieron menos capacidad antioxidante que el resto de los tratamientos (Cuadro 7). En general, a los 45 días los tratamientos 15 DA fueron 4.7% más altos que 21 DA, caso contrario a los 90 días, los tratamientos 21 DA tuvieron 1.4% más capacidad antioxidante que 15 DA (Figura 12). Por otra parte, el testigo incrementó 14.49% con $15\ 220 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ respecto a la concentración $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ que obtuvo la capacidad antioxidante más baja con $13\ 014 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.

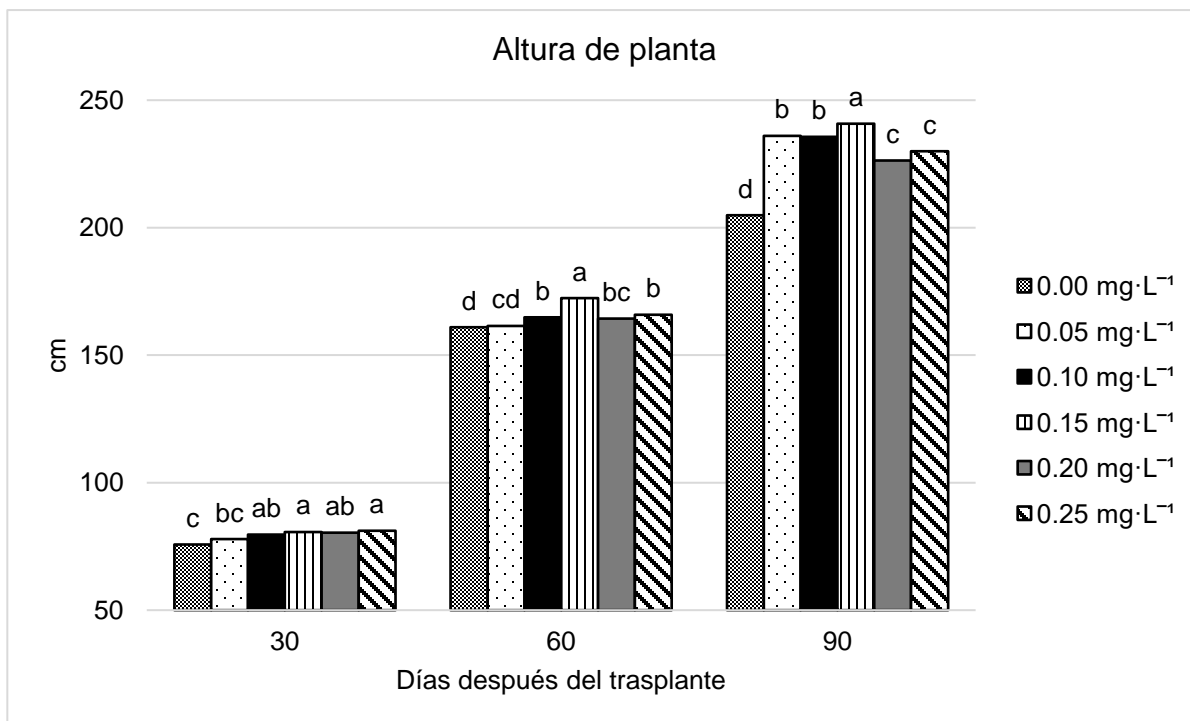


Figura 8. Altura de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida. Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

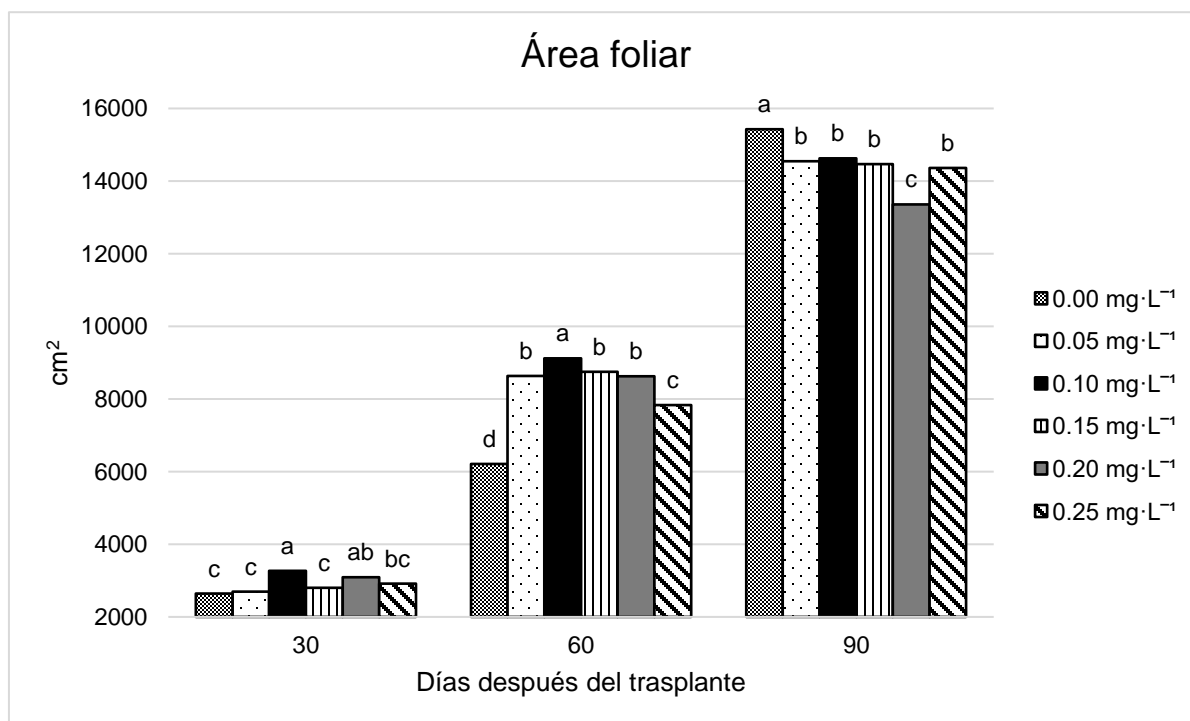


Figura 9. Área foliar de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida. Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

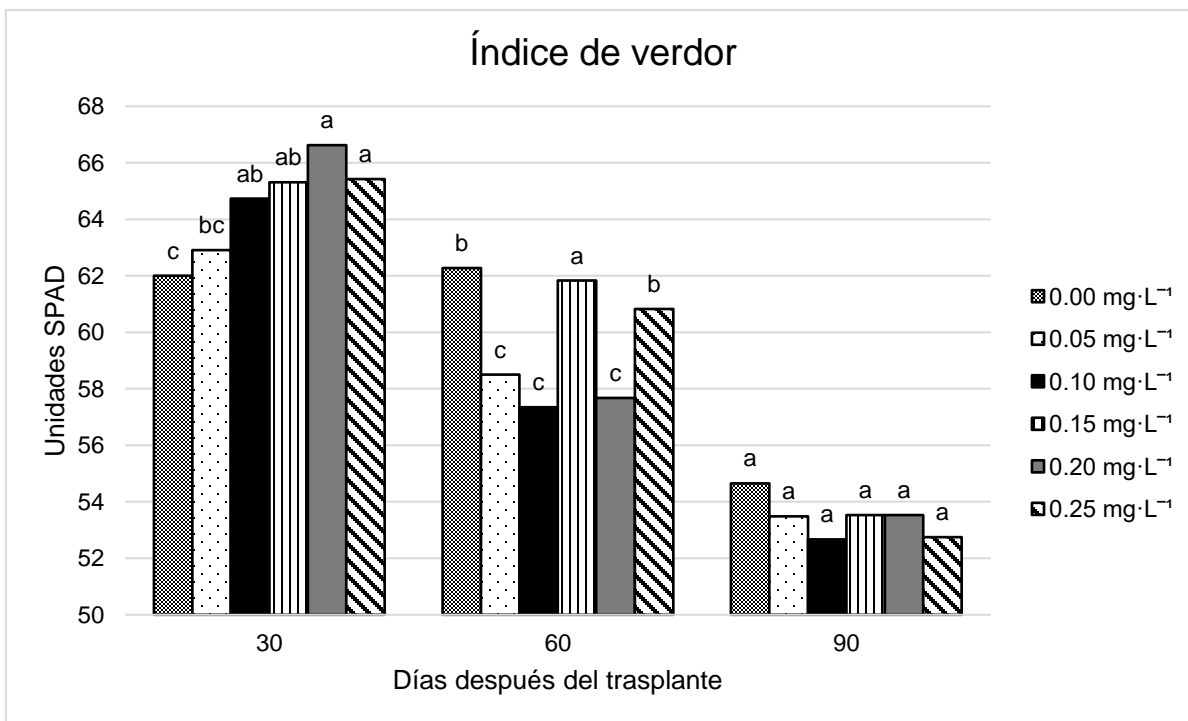


Figura 10. Índice de verdor de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida. Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

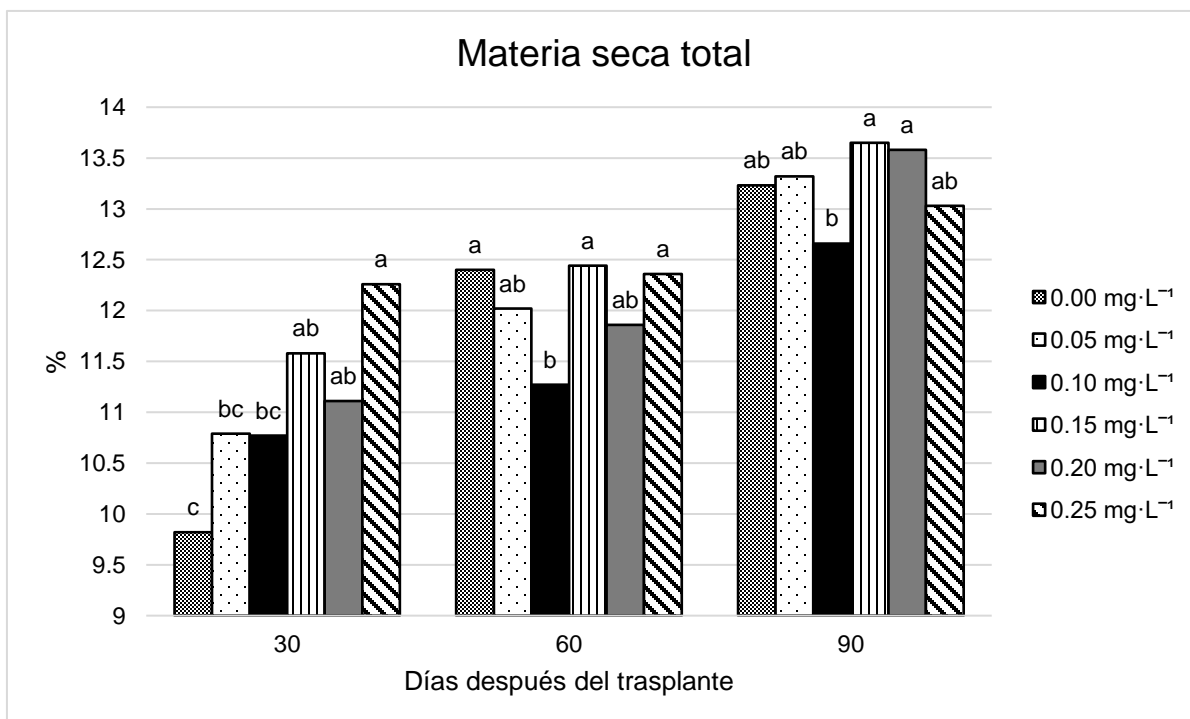


Figura 11. Materia seca total de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida. Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Cuadro 4. Altura de planta (A), área foliar (AF), grosor de tallo (GT), longitud de raíz (LR), rendimiento (R) y número de frutos con BER (BER) de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida.

| Tratamiento | | A (cm) | | AF (cm ²) | | GT (mm) | | LR (cm) | | R (g-planta ⁻¹) | | BER | |
|-------------|-------|--------|----|-----------------------|-----|---------|----|---------|----|-----------------------------|-----|-------|----|
| F | C | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | 233.83 | a | 14607.00 | a | 13.93 | a | 39.39 | b | 7484.89 | a | 6.00 | a |
| 21 | | 224.06 | b | 14326.00 | b | 13.89 | a | 41.61 | a | 7199.61 | b | 5.77 | a |
| | DMSH | 2.50 | | 275.98 | | 1.09 | | 0.96 | | 234.38 | | 1.33 | |
| | 0.00 | 204.83 | d | 15431.00 | a | 13.46 | b | 45.67 | a | 6566.00 | b | 9.83 | a |
| | 0.05 | 236.00 | b | 14548.00 | b | 13.93 | b | 40.50 | c | 7550.67 | a | 6.17 | b |
| | 0.10 | 235.67 | b | 14624.00 | b | 13.82 | b | 37.67 | d | 7541.50 | a | 4.83 | b |
| | 0.15 | 240.83 | a | 14466.00 | b | 13.82 | b | 40.00 | c | 7735.17 | a | 5.67 | b |
| | 0.20 | 226.33 | c | 13361.00 | c | 15.46 | a | 42.17 | b | 6779.33 | b | 4.50 | b |
| | 0.25 | 230.00 | c | 14366.00 | b | 12.98 | b | 37.00 | d | 7880.83 | a | 4.33 | b |
| | DMSH | 3.95 | | 359.36 | | 1.31 | | 1.65 | | 483.43 | | 2.04 | |
| 15 | 0.00 | 204.00 | e | 15660.96 | a | 13.67 | ab | 46.00 | a | 6776.67 | bc | 9.33 | ab |
| | 0.05 | 248.67 | a | 15254.81 | a | 13.94 | ab | 38.33 | d | 7714.33 | ab | 6.00 | bc |
| | 0.10 | 246.67 | a | 15369.90 | a | 13.34 | b | 37.67 | d | 7875.33 | a | 5.67 | bc |
| | 0.15 | 245.00 | a | 14447.61 | bc | 14.12 | ab | 38.33 | d | 7889.67 | a | 5.67 | bc |
| | 0.20 | 226.00 | cd | 13751.08 | cd | 16.02 | a | 42.67 | bc | 6766.67 | bc | 5.33 | bc |
| | 0.25 | 232.67 | bc | 13155.70 | de | 12.51 | b | 33.33 | e | 7886.67 | a | 4.00 | c |
| 21 | 0.00 | 205.67 | e | 15201.30 | a | 13.25 | b | 45.33 | ab | 6355.33 | c | 10.33 | a |
| | 0.05 | 223.33 | d | 13840.27 | bcd | 13.92 | ab | 42.67 | bc | 7387.00 | ab | 6.33 | bc |
| | 0.10 | 224.67 | d | 13878.31 | bc | 14.29 | ab | 37.67 | d | 7207.67 | abc | 4.00 | c |
| | 0.15 | 236.67 | b | 14485.22 | b | 13.51 | b | 41.67 | c | 7580.67 | ab | 5.67 | bc |
| | 0.20 | 226.67 | cd | 12971.77 | e | 14.90 | ab | 41.67 | c | 6792.00 | bc | 3.67 | c |
| | 0.25 | 227.33 | cd | 15576.45 | a | 13.44 | b | 40.67 | cd | 7875.00 | a | 4.67 | c |
| | DMSH | 7.84 | | 703.25 | | 2.51 | | 3.23 | | 988.53 | | 4.06 | |
| | CVf % | 0.76 | | 1.33 | | 5.45 | | 1.65 | | 2.23 | | 15.76 | |
| | CVc % | 0.95 | | 1.37 | | 5.17 | | 2.24 | | 3.63 | | 19.07 | |

DMSH: Diferencia Mínima Significativa Honesta; F: Frecuencia; C: Concentración; CVf: Coeficiente de variación para frecuencia; CVc: Coeficiente de variación para concentración; Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Como se observó en la respuesta de las plantas expuestas a BL, la presencia Ca^{2+} y ROS inducen la señalización por BR que desencadena los mecanismos protectores contra el estrés, especialmente estimula el sistema antioxidante, lo que conlleva a un aumento de la resistencia térmica de las células vegetales (Kolupaev et al., 2014). Es necesario mencionar que el H_2O_2 , es una de las ROS más importantes debido a que desempeña un papel crucial en los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas, así como en las respuestas al estrés. Recientemente, se ha evidenciado que BR aumenta el nivel celular de H_2O_2 , fundamental para el alargamiento y la división celular

de la raíz, al inducir la oxidación de BZR1 en un residuo de cisteína conservado, la modulación redox de BZR1 juega un papel importante en la transducción de señales BR (Tian et al., 2018). El proceso, a su vez, desencadena una mayor biosíntesis de ABA, lo que conduce a mayores aumentos en la producción de H₂O₂ y una tolerancia prolongada al estrés (Zhou et al., 2014). Como se observó en plantas no expuestas a BL, la deficiencia de Ca²⁺ afecta la actividad antioxidante de las enzimas ascorbato-glutación, lo que inhibe la glutatión reductasa, conduce a la ruptura de la homeostasis celular, inhibe otras enzimas responsables de la desintoxicación del H₂O₂ y aumenta la peroxidación lipídica, que ocasiona la aparición del BER (Mestre et al., 2012), esto supone un aumento en el número de frutos no comerciales y la reducción de la productividad del cultivo de tomate.

Cuadro 5. Índice de verdor (IV) y peso específico de hojas (PE) de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida.

| Tratamiento | | IV (Unidades SPAD) | | PE (g·cm ⁻²) | |
|-------------|------|--------------------|-----|--------------------------|-------------------------|
| F | C | | | | |
| 15 | | 53.5 | a | 7.77 x 10 ⁻³ | a |
| 21 | | 53.4 | a | 7.75 x 10 ⁻³ | a |
| DMSH | | 9.9 | | 3.00 x 10 ⁻⁴ | |
| | 0.00 | 54.7 | a | 8.09 x 10 ⁻³ | a |
| | 0.05 | 53.5 | a | 7.49 x 10 ⁻³ | d |
| | 0.10 | 52.7 | a | 7.79 x 10 ⁻³ | bc |
| | 0.15 | 53.5 | a | 7.99 x 10 ⁻³ | ab |
| | 0.20 | 53.5 | a | 7.49 x 10 ⁻³ | d |
| | 0.25 | 52.8 | a | 7.70 x 10 ⁻³ | cd |
| | | | 9.3 | | 2.00 x 10 ⁻⁴ |
| DMSH 15 | 0.00 | 54.8 | a | 8.10 x 10 ⁻³ | ab |
| | 0.05 | 56.9 | a | 7.67 x 10 ⁻³ | b |
| | 0.10 | 52.6 | a | 7.63 x 10 ⁻³ | bc |
| | 0.15 | 51.8 | a | 7.72 x 10 ⁻³ | b |
| | 0.20 | 54.9 | a | 7.83 x 10 ⁻³ | ab |
| | 0.25 | 49.4 | a | 7.67 x 10 ⁻³ | b |
| | | | | | |
| 21 | 0.00 | 54.5 | a | 8.08 x 10 ⁻³ | ab |
| | 0.05 | 50.1 | a | 7.31 x 10 ⁻³ | c |
| | 0.10 | 52.7 | a | 7.94 x 10 ⁻³ | ab |
| | 0.15 | 55.2 | a | 8.26 x 10 ⁻³ | a |
| | 0.20 | 52.2 | a | 7.16 x 10 ⁻³ | c |
| | 0.25 | 56.1 | a | 7.73 x 10 ⁻³ | b |
| DMSH | | 17.74 | | 4.85 x 10 ⁻⁴ | |
| CVf % | | 13.04 | | 2.85 | |
| CVc % | | 9.59 | | 1.76 | |

DMSH: Diferencia Mínima Significativa Honesta; F: Frecuencia; C: Concentración; CVf: Coeficiente de variación para frecuencia; CVc: Coeficiente de variación para concentración; Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, p≤0.05).

Por otra parte, a los 45 DDT los tratamientos 15 DA presentaron mayor contenido de fenoles que 21 DA, con $219.80 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 5.63 % más respecto a $207.42 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (Figura 13), la concentración $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ generó menor contenido de fenoles, $186.30 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 17.92 % menos que el testigo, el cual presentó el contenido más alto en conjunto con las concentraciones 0.10 y $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, con 227.12 , 224.81 y $216.78 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente. A los 90 DDT, el contenido de fenoles más alto lo obtuvo la concentración $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con $332.42 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ mientras que el testigo fue el más bajo con $259.7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 28 % menos contenido de fenoles respecto a la concentración $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Cuadro 7). Se observó que las interacciones $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 15 DA y $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 21 DA obtuvieron mayor contenido de fenoles con 341.95 y $329.95 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ mientras que $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 15 DA obtuvo el menor contenido con $229.44 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.

Cuadro 6. Materia seca total, hojas, tallo y raíz de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida.

| Tratamiento | | Materia seca (%) | | | | | | | |
|-------------|-------|------------------|-------|--------|-------|-------|------|-------|---|
| F | C | Total | Hojas | | Tallo | | Raíz | | |
| 15 | | 13.20 | a | 12.08 | b | 15.65 | a | 11.79 | b |
| 21 | | 13.29 | a | 12.19 | a | 15.81 | a | 12.05 | a |
| | DMSH | 0.34 | | 0.0041 | | 0.51 | | 0.23 | |
| | 0.00 | 13.24 | ab | 12.20 | a | 15.82 | ab | 11.87 | a |
| | 0.05 | 13.33 | ab | 12.25 | a | 15.64 | ab | 12.33 | a |
| | 0.10 | 12.66 | b | 11.75 | a | 15.01 | b | 11.93 | a |
| | 0.15 | 13.65 | a | 12.38 | a | 16.11 | a | 11.86 | a |
| | 0.20 | 13.58 | a | 12.39 | a | 16.08 | a | 11.57 | a |
| | 0.25 | 13.04 | ab | 11.82 | a | 15.71 | ab | 11.95 | a |
| | DMSH | 0.68 | | 0.87 | | 0.87 | | 1.06 | |
| 15 | 0.00 | 13.24 | a | 12.10 | a | 15.81 | ab | 11.98 | a |
| | 0.05 | 13.39 | a | 12.36 | a | 15.62 | ab | 12.08 | a |
| | 0.10 | 12.67 | a | 12.05 | a | 14.35 | b | 11.36 | a |
| | 0.15 | 13.52 | a | 11.99 | a | 16.47 | a | 11.48 | a |
| | 0.20 | 13.72 | a | 12.49 | a | 16.30 | a | 11.75 | a |
| | 0.25 | 12.68 | a | 11.45 | a | 15.33 | ab | 12.08 | a |
| 21 | 0.00 | 13.23 | a | 12.29 | a | 15.83 | ab | 11.76 | a |
| | 0.05 | 13.26 | a | 12.13 | a | 15.66 | ab | 12.59 | a |
| | 0.10 | 12.66 | a | 11.45 | a | 15.67 | ab | 12.49 | a |
| | 0.15 | 13.78 | a | 12.76 | a | 15.74 | ab | 12.23 | a |
| | 0.20 | 13.44 | a | 12.28 | a | 15.86 | ab | 11.39 | a |
| | 0.25 | 13.39 | a | 12.19 | a | 16.09 | a | 11.83 | a |
| | DMSH | 1.40 | | 1.85 | | 1.71 | | 2.27 | |
| | CVf % | 1.80 | | 0.02 | | 2.28 | | 1.34 | |
| | CVc % | 2.84 | | 3.95 | | 3.04 | | 4.90 | |

DMSH: Diferencia Mínima Significativa Honesta; F: Frecuencia; C: Concentración; CVf: Coeficiente de variación para frecuencia; CVc: Coeficiente de variación para concentración; Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

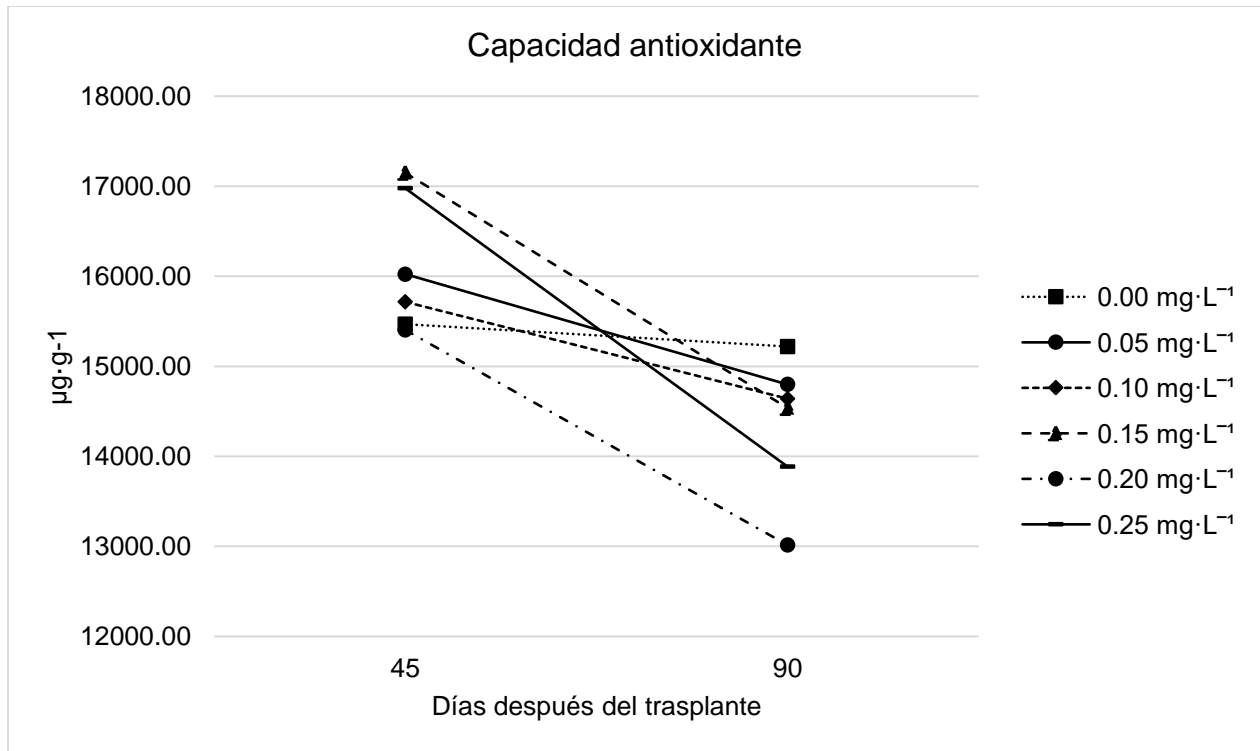


Figura 12. Capacidad antioxidante de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida.

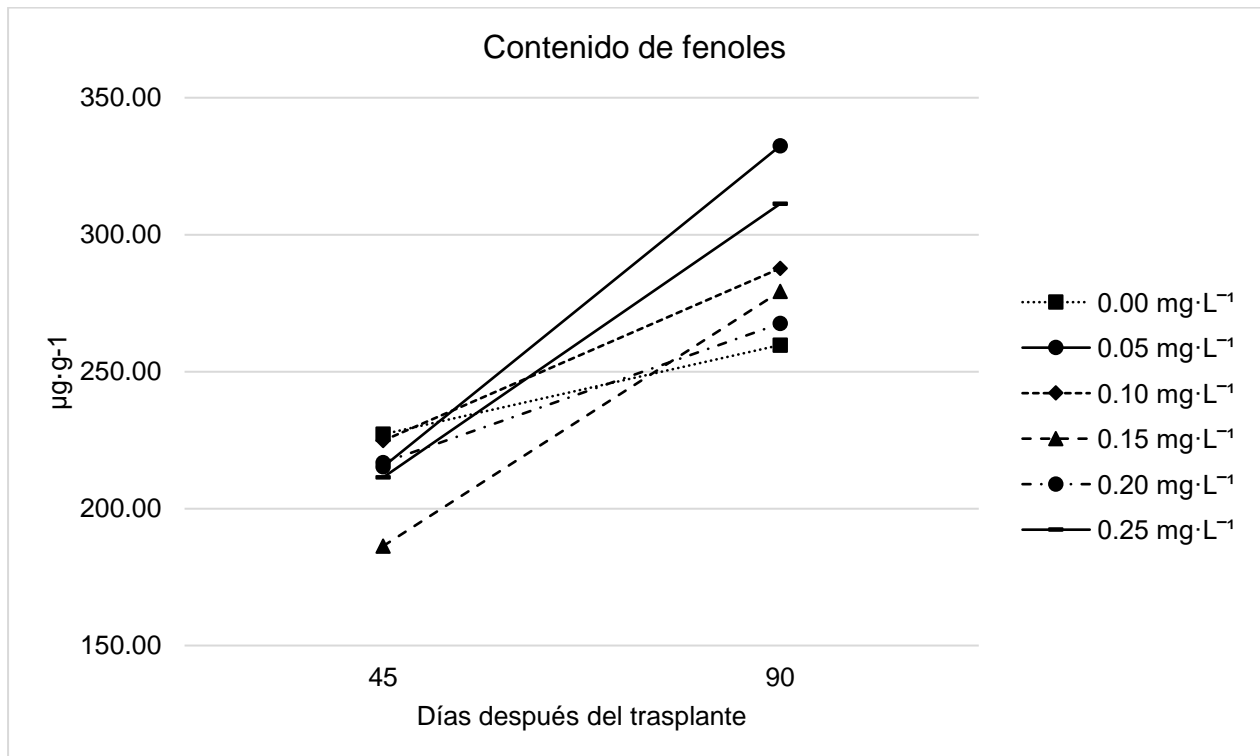


Figura 13. Contenido de fenoles de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida.

Similar a lo encontrado en esta investigación, la aplicación de epiBL (1 μ M) en plantas de tomate aumentó el contenido de fenoles y flavonoides totales, 61.02 y 35.74 %, respectivamente, lo cual optimizó la acumulación de osmolitos y el metabolismo antioxidante, previno el daño oxidativo mediante la reducción del exceso de acumulación de ROS e indujo el crecimiento y la protección fotosintética (Ahanger et al., 2020). Los compuestos fenólicos actúan como compuestos antioxidantes potenciales al donar electrones a las guayacol peroxidasas (GuPXs) para la detoxificación de grandes cantidades de H₂O₂ producidas en condiciones de estrés (Bartwal et al., 2013), en este caso, la acumulación de fenoles en las plantas fue inducida por estrés térmico, sin embargo, también puede desencadenarse debido a la radiación UV, la exposición a una alta luminosidad, lesiones, deficiencia de nutrientes y la presencia de patógenos.

Cuadro 7. Capacidad antioxidante y contenido de fenoles de hojas de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida.

| Tratamiento | | Capacidad antioxidante (μ g·g ⁻¹) | | | | Contenido de fenoles (μ g·g ⁻¹) | | | |
|-------------|-------|--|----|----------|----|--|----|--------|-------|
| F | C | 45 DDT | | 90 DDT | | 45 DDT | | 90 DDT | |
| 15 | | 16511.00 | a | 14246.00 | b | 219.80 | a | 276.51 | a |
| 21 | | 15734.00 | b | 14451.00 | a | 207.42 | b | 302.79 | a |
| | DMSH | 524.76 | | 118.31 | | 1.68 | | 39.08 | |
| | 0.00 | 15468.00 | c | 15220.00 | a | 227.12 | a | 259.70 | d |
| | 0.05 | 16024.00 | b | 14798.00 | b | 215.26 | ab | 332.42 | a |
| | 0.10 | 15716.00 | bc | 14640.00 | b | 224.81 | a | 287.71 | bc |
| | 0.15 | 17148.00 | a | 14536.00 | b | 186.30 | b | 279.25 | cd |
| | 0.20 | 15403.00 | c | 13014.00 | d | 216.78 | a | 267.54 | cd |
| | 0.25 | 16977.00 | a | 13885.00 | c | 211.37 | ab | 311.27 | ab |
| | DMSH | 435.57 | | 387.60 | | 29.86 | | 27.86 | |
| 15 | 0.00 | 15532.35 | cd | 15076.86 | ab | 219.05 | a | 264.27 | cdef |
| | 0.05 | 17684.83 | a | 15442.26 | a | 245.24 | a | 341.95 | a |
| | 0.10 | 15091.88 | de | 14942.88 | ab | 234.08 | a | 245.47 | ef |
| | 0.15 | 16750.71 | b | 14568.93 | b | 185.16 | a | 271.05 | bcdef |
| | 0.20 | 16445.80 | b | 11298.15 | d | 224.63 | a | 229.44 | f |
| | 0.25 | 17562.69 | ab | 14149.74 | bc | 210.63 | a | 306.86 | abcd |
| 21 | 0.00 | 15403.52 | d | 15363.91 | a | 235.20 | a | 255.14 | def |
| | 0.05 | 14362.93 | e | 14152.81 | bc | 185.28 | a | 322.89 | ab |
| | 0.10 | 16340.33 | bc | 14336.28 | bc | 215.55 | a | 329.95 | a |
| | 0.15 | 17545.14 | ab | 14502.69 | b | 187.44 | a | 287.45 | abcde |
| | 0.20 | 14360.23 | e | 14730.26 | ab | 208.94 | a | 305.64 | abcd |
| | 0.25 | 16391.99 | b | 13619.54 | c | 212.11 | a | 315.67 | abc |
| | DMSH | 846.64 | | 775.65 | | 63.51 | | 55.27 | |
| | CVf % | 2.27 | | 0.57 | | 0.55 | | 9.41 | |
| | CVc % | 1.49 | | 1.49 | | 7.70 | | 5.30 | |

DMSH: Diferencia Mínima Significativa Honesta; F: Frecuencia; C: Concentración; DDT: Días después del trasplante; CVf: Coeficiente de variación para frecuencia; CVc: Coeficiente de variación para concentración; Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Correlaciones

Se estableció una correlación de Pearson fuerte entre el rendimiento y la altura $r= 0.73$, una correlación débil de rendimiento respecto al área foliar $r= 0.11$, correlación moderada de rendimiento respecto a la longitud de raíz y número de frutos con BER con $r= -0.69$ y -0.45 , respectivamente (Figura 14, 15, 16 y 17). Esto señala que el rendimiento fue favorecido por la altura y menor número de frutos afectados con BER, aunque el área foliar y la longitud de raíz disminuyeron en las plantas aplicadas con BL el rendimiento no disminuyó, por el contrario, se vio favorecido tal como sucedió en la fase previa. Lo que refuerza la capacidad de BL para incentivar la tolerancia al estrés del tomate y con ello, mejorar la productividad del cultivo.

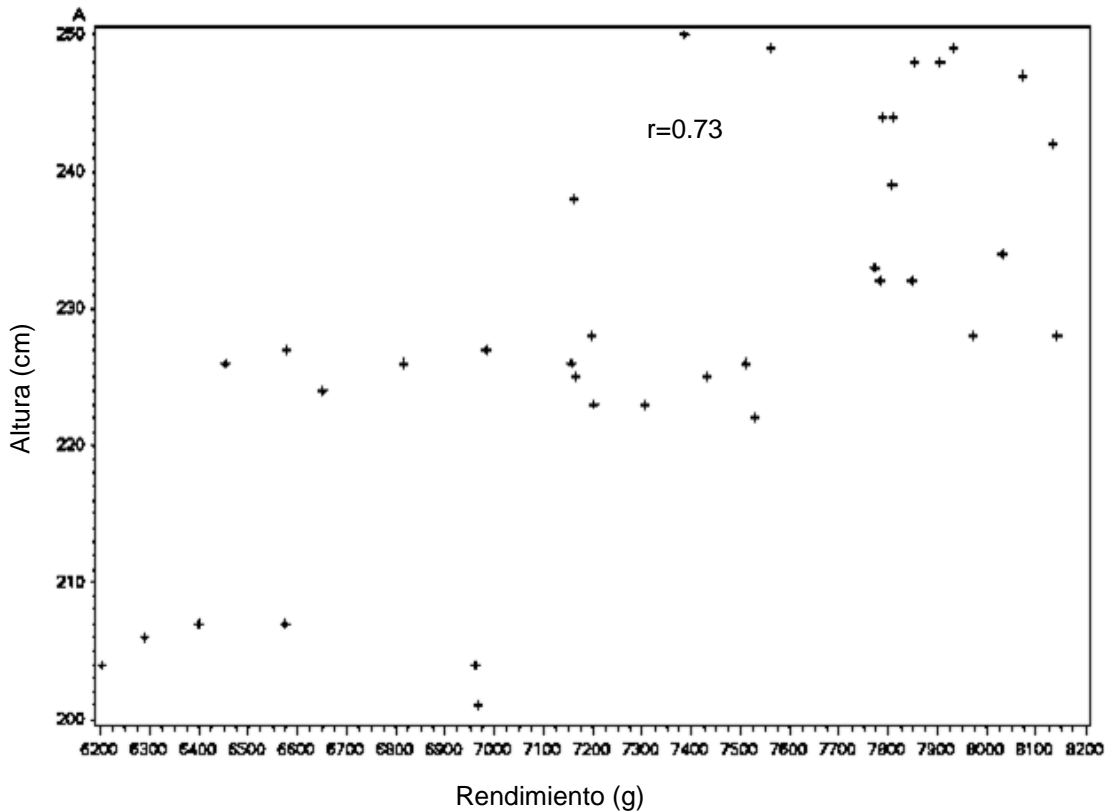


Figura 14. Correlación de Pearson de rendimiento vs altura de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida.

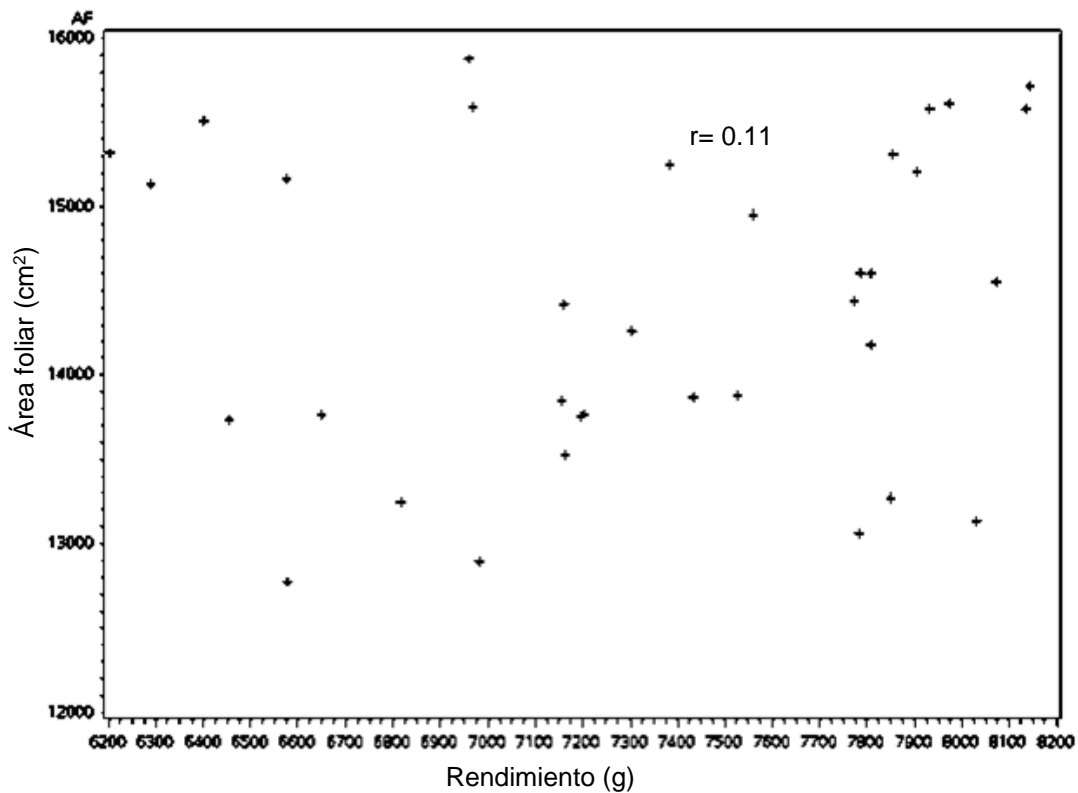


Figura 15. Correlación de Pearson de rendimiento vs área foliar de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida.

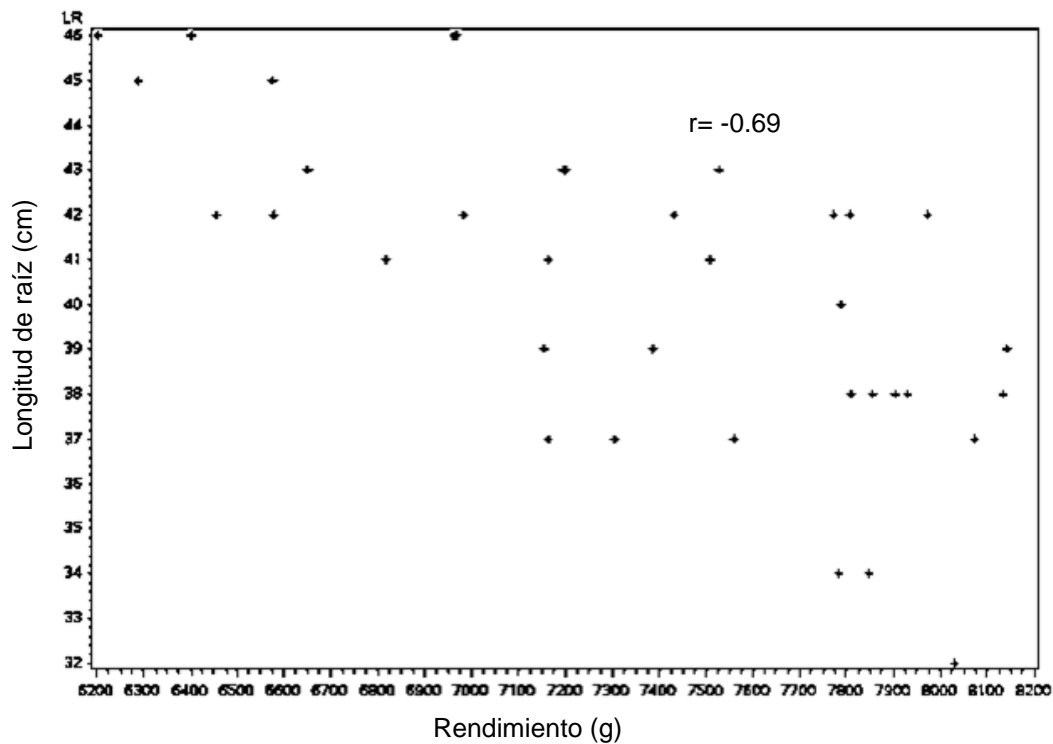


Figura 16. Correlación de Pearson de rendimiento vs longitud de raíz de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida.

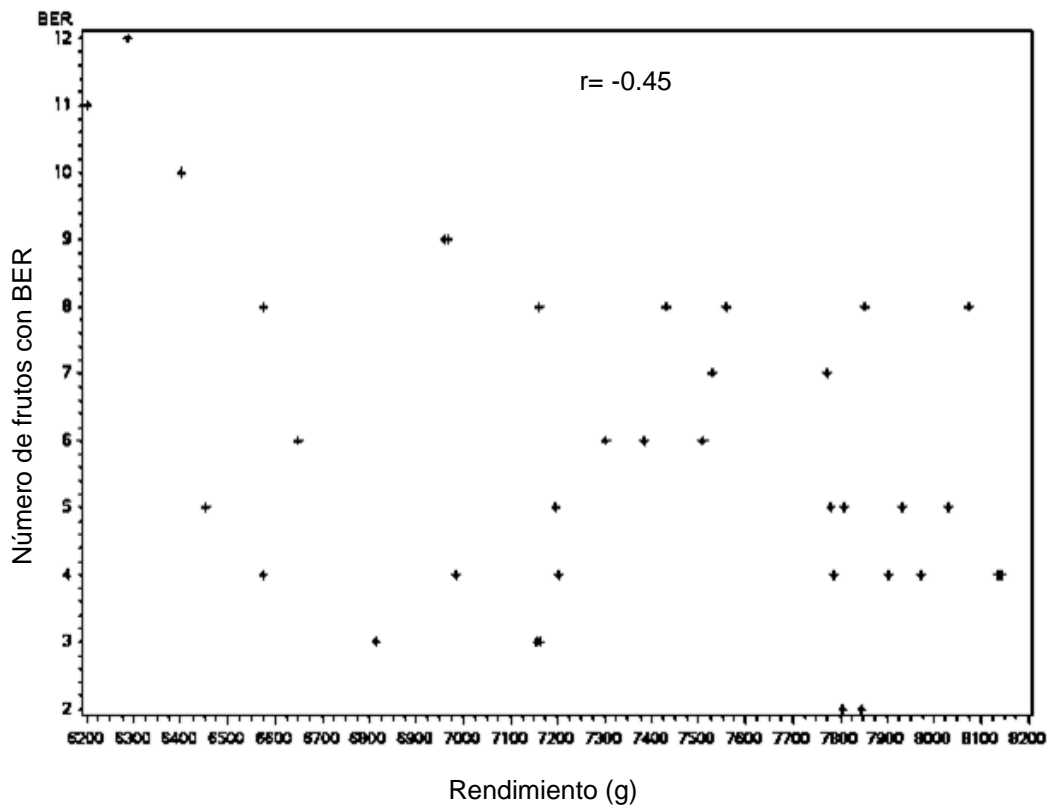


Figura 17. Correlación de Pearson de rendimiento vs número de frutos con BER de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida.

Por último, los resultados obtenidos en este estudio señalaron que la concentración y el número de aplicaciones de BL influyó en las variables analizadas, pues los tratamientos 15 DA y 21 DA presentaron diferencias significativas en variables de interés como altura, biomasa seca, rendimiento, número de frutos con BER, capacidad antioxidante y contenido de fenoles en hojas. Esto sugiere que, a partir de tres aplicaciones en cualquiera de las dos frecuencias (15 DA y 21 DA) a dosis bajas (0.05 , 0.10 y $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), preferentemente en etapas tempranas de desarrollo, se favorece la bioestimulación de las plantas de tomate, incentiva la tolerancia al estrés térmico y se obtienen resultados de cosecha favorables.

4.6 Conclusión

La aplicación de BL favoreció procesos que median la respuesta al estrés ambiental causado por altas temperaturas. BL influyó en el crecimiento en diferentes etapas de desarrollo vegetal, además, se identificó aumento del contenido de antioxidantes y fenoles en las hojas, los cuales son compuestos importantes en la adaptación al estrés de las plantas. La aplicación de BL disminuyó el número de frutos con BER, por lo tanto, redujo pérdidas en el cultivo y aumentó el rendimiento, lo cual reafirma la respuesta que se obtuvo en la primera fase exploratoria.

4.7 Literatura citada

- Ahanger, M. A., Mir, R. A., Alyemeni, M. N., & Ahmad, P. (2020). Combined effects of brassinosteroid and kinetin mitigates salinity stress in tomato through the modulation of antioxidant and osmolyte metabolism. *Plant Physiology and Biochemistry*, *147*, 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.12.007>
- Ali, M. M., Anwar, R., Malik, A. U., Khan, A. S., Ahmad, S., Hussain, Z., Hasan, M. U., Nasir, M., & Chen, F. (2022). Plant growth and fruit quality response of strawberry is improved after exogenous application of 24-epibrassinolide. *Journal of Plant Growth Regulation*, *41*(4), 1786-1799. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10422-2>
- Ayankojo , I. T., & Morgan, K. T. (2020). Increasing air temperatures and its effects on growth and productivity of tomato in South Florida. *Plants*, *9*(9), Artículo 1245. <https://doi.org/10.3390/plants9091245>
- Bartwal, A., Mall, R., Lohani, P., Guru, S. K., & Arora, S. (2013). Role of secondary metabolites and brassinosteroids in plant defense against environmental stresses. *Journal of Plant Growth Regulation*, *32*(1), 216-232. <https://doi.org/10.1007/s00344-012-9272-x>
- Chaiwanon, J., & Wang, Z. Y. (2015). Spatiotemporal brassinosteroid signaling and antagonism with auxin pattern stem cell dynamics in *Arabidopsis* roots. *Current Biology*, *25*(8), 1031-1042. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.02.046>
- Chung, Y., & Choe, S. (2013). The regulation of brassinosteroid biosynthesis in *Arabidopsis*. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *32*(6), 396-410. <https://doi.org/10.1080/07352689.2013.797856>
- Ferreira Maia, C., Serrão da Silva, B. R., & da Silva Lobato, A. K. (2018). Brassinosteroids positively modulate growth: Physiological, biochemical and anatomical evidence using two tomato genotypes contrasting to dwarfism. *Journal of Plant Growth Regulation*, *37*(4), 1099-1112. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9802-2>
- Fertilab. (2021). *Manual de muestreo Fertilab* (4ta edición digital). Fertilab laboratorio de análisis agrícolas. <https://www.fertilab.com.mx/new/files/Manual-de-Muestreo-4ta-Edicion.pdf>
- Fridman, Y., Elkouby, L., Holland, N., Vragovic, K., Elbaum, R., & Savaldi-Goldstein, S. (2014). Root growth is modulated by differential hormonal sensitivity in neighboring cells. *Genes & Development*, *28*(8), 912-920. <https://doi:10.1101/gad.239335.114>
- GCMA. (2024). *Perspectivas Agroalimentarias 2024*. Grupo Consultor de Mercados Agrícolas. <https://drive.google.com/file/d/1KIHlbnZx3IU1fxJzHY0xFDCAtWlzz5/view>
- Hu, Y. J., Shi, L. X., Sun, W., & Guo, J. X. (2013). Effects of abscisic acid and brassinolide on photosynthetic characteristics of *Leymus chinensis* from songnen plain grassland in Northeast China. *Botanical Studies*, *54*(1), Artículo 42. <https://doi.org/10.1186/1999-3110-54-42>

- Hurtado, E., González-Vallejos, F., Röper, C., Bastías, E., & Mazuela, P. (2017). Propuesta para la determinación del contenido de clorofila en hojas de tomate. *Idesia*, 35(4), 129-130. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292017000400129>
- Irfan, M., Alam, J., Ahmad, I., Ali, I., & Gul, H. (2017). Effects of exogenous and foliar applications of brassinosteroid (BRs) and salt stress on the growth, yield and physiological parameters of *Lycopersicon esculentum* (Mill.). *Plant Science Today*, 4(3), 88-101. <https://doi.org/10.14719/pst.2017.4.3.218>
- Jasso Chaverría, C., Martínez Gamiño, M. A., Chávez Vázquez, J. R., Ramírez Télles, J. A., & Garza Urbina, E. (2012). *Guía para cultivar jitomate en condiciones de malla sombra en San Luis Potosí* (Folleto técnico Núm. MX-0-310305-49-03-17-09-44). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/905.pdf>
- Keuskamp, D. H., Sasidharan, R., Vos, I., Peeters, A. J., Voeselek, L. A., & Pierik, R. (2011). Blue-light-mediated shade avoidance requires combined auxin and brassinosteroid action in *Arabidopsis* seedlings. *The Plant Journal*, 67(2), 208-217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2011.04597.x>
- Kolupaev, Y. E., Vayner, A. A., Yastreb, T. O., Oboznyi, A. I., & Khripach, V. A. (2014). The role of reactive oxygen species and calcium ions in the implementation of the stress protective effect of brassinosteroids on plant cells. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 50(6), 658-663. <https://doi.org/10.1134/S0003683814060076>
- Malone, M., White, P., & Morales, M. (2002). Mobilization of calcium in glasshouse tomato plants by localized scorching. *Journal of Experimental Botany*, 53(366), 83-88. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.366.83>
- Martínez González, L., Reyes Guerrero, Y., Pérez Domínguez, G., Nápoles García, M. C., & Núñez Vázquez, M. (2018). Influencia del biobras-16® y el quitomax® en aspectos de la biología de plantas de frijol. *Cultivos Tropicales*, 39(1), 108-112.
- Mazorra, L., & Núñez, M. (2003). Influencia de análogos de brasinoesteroides en la respuesta de plantas de tomate a diferentes estrés ambientales. *Cultivos Tropicales*, 24(1), 35-40.
- Mestre, T. C., Garcia-Sanchez, F., Rubio, F., Martinez, V., & Rivero, R. M. (2012). Glutathione homeostasis as an important and novel factor controlling blossom-end rot development in calcium-deficient tomato fruits. *Journal of Plant Physiology*, 168(17), 1719-1727. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.07.013>
- Mumtaz, M. A., Munir, S., Liu, G., Chen, W., Wang, Y., Yu, H., Mahmood, S., Ahiakpa, J. K., Tamim, S. A., & Zhang, Y. (2020). Altered brassinolide sensitivity1 transcriptionally inhibits chlorophyll synthesis and photosynthesis capacity in tomato. *Plant Growth Regulation*, 92(9), 417-426. <https://doi.org/10.1007/s10725-020-00650-z>
- Nakaya, M., Tsukaya, H., Murakami, N., & Kato, M. (2002). Brassinosteroids control the proliferation of leaf cells of *Arabidopsis thaliana*. *Plant and Cell Physiology*, 43(2), 239-244. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcf024>

- Nolan, T. M., Vukašinović, N., Liu, D., Russinova, E., & Yin, Y. (2020). Brassinosteroids: Multidimensional regulators of plant growth, development, and stress responses. *The Plant Cell*, *32*(2), 295–318. <https://doi.org/10.1105/tpc.19.00335>
- Ozgen, M., Reese, R. N., Tulio Jr., A. Z., Scheerens, J. C., & Miller, R. (2006). Modified 2,2-azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid (ABTS) method to measure antioxidant capacity of selected small fruits and comparison to ferric reducing antioxidant power (FRAP) and 2,2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) methods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *54*(4), 1151-1157. <https://doi.org/10.1021/jf051960d>
- Peil, R. M., & López-Gálvez, J. (2002). Effect of fruit removal on growth and biomass partitioning in cucumber. *Acta Horticulturae*, *588*(9), 69-74. <https://doi:10.17660/ActaHortic.2002.588.9>
- Planas-Riverola, A., Gupta, A., Betegón-Putze, I., Bosch, N., Ibañes, M., & Caño-Delgado, A. (2019). Brassinosteroid signaling in plant development and adaptation to stress. *Development*, *146*(5), Artículo dev151894. <https://doi.org/10.1242/dev.151894>
- Saure, M. C. (2014). Why calcium deficiency is not the cause of blossom-end rot in tomato and pepper fruit – a reappraisal. *Scientia Horticulturae*, *174*(1), 151-154. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.05.020>
- Schober, P., Bóer, C., & Schwarte, L. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, *126*(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Singh, I., & Shono, M. (2005). Physiological and molecular effects of 24-epibrassinolide, a brassinosteroid on thermotolerance of tomato. *Plant Growth Regulation*, *47*(2), 111-119. <https://doi.org/10.1007/s10725-005-3252-0>
- Soni, S., Vishwakarma, G., Singh, S., Kumar, S., Singh, R., Awasthi, P., & Gangwar, V. (2022). Commercial use of plant growth regulators in horticultural crops: An overview. *The Pharma Innovation Journal*, *11*(6), 112-119.
- Sun, Y., Fan, X.-Y., Cao, D. M., He, K., Tang, W., Zhu, J. Y., He, J. X., Bai, M. Y., Zhu, S., Oh, E., Patil, S., Kim, T. W., Ji, H., Wong, W. H., Rhee, S. Y., & Wang, Z. Y. (2010). Integration of brassinosteroid signal transduction with the transcription network for plant growth regulation in *Arabidopsis*. *Developmental Cell*, *19*(5), 765-777. <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2010.10.010>
- Tadeu-Dias, J. P. (2019). Plant growth regulators in horticulture: practices and perspectives. *Bioteconología Vegetal*, *19*(1), 3-14.
- Tian, Y., Fan, M., Qin, Z., Lv, H., Wang, M., Zhang, Z., Zhou, W., Zhao, N., Li, X., Han, C., Ding, Z., Wang, W., Wang, Z. Y., & Bai, M. Y. (2018). Hydrogen peroxide positively regulates brassinosteroid signaling through oxidation of the brassinazole-resistant1 transcription factor. *Nature Communications*, *9*(1), Artículo 1063. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03463-x>

- Topcu, Y., Nambeesan, S. U., & Van der Knaap, E. (2022). Blossom-end rot: A century-old problem in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and other vegetables. *Molecular Horticulture*, 2(1), Artículo 1. <https://doi.org/10.1186/s43897-021-00022-9>
- Vardhini, B., & Anjum, N. (2015). Brassinosteroids make plant life easier under abiotic stresses mainly by modulating major components of antioxidant defense system. *Frontiers in Environmental Science*, 2(67). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00067>
- Velasco Alvarado, M. J., Castro Brindis, R., Castillo González, A. M., Avitia García, E., Sahagún Castellanos, J., & Lobato Ortiz, R. (2016). Composición mineral, biomasa y rendimiento en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) injertado. *Interciencia*, 41(10), 703-708.
- Waterman, P. G., & Mole, S. (1994). *Analysis of phenolic plant metabolites*. Blackwell Scientific Publications.
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487-511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>
- Xie, L., Yang, C., & Wang, X. (2011). Brassinosteroids can regulate cellulose biosynthesis by controlling the expression of CESA genes in *Arabidopsis*. *Journal of Experimental Botany*, 62(13), 4495-4506. <https://doi.org/10.1093/jxb/err164>
- Yan, M. Y., Xie, D. L., Cao, J. J., Xia, X. J., Shi, K., Zhou, Y. H., Zhou, J., Foyer, C. H., & Yu, J. Q. (2020). Brassinosteroid-mediated reactive oxygen species are essential for tapetum degradation and pollen fertility in tomato. *The Plant Journal*, 102(5), 931-947. <https://doi.org/10.1111/tpj.14672>
- Yin, X., Tang, M., Xia, X., & Yu, J. (2022). Brassinazole resistant1 mediates brassinosteroid-induced calvin cycle to promote photosynthesis in tomato. *Frontier in Plant Science*, 12, Artículo 811948. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.811948>
- Zhao, B., & Li, J. (2012). Regulation of brassinosteroid biosynthesis and inactivation. *Journal of Integrative Plant Biology*, 54(10), 746-759. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2012.01168.x>
- Zhou, J., Wang, J., Li, X., Xia, X. J., Zhou, Y. H., Shi, K., Chen, Z., & Yu, J. Q. (2014). H₂O₂ mediates the crosstalk of brassinosteroid and abscisic acid in tomato responses to heat and oxidative stresses. *Journal of Experimental Botany*, 65(15), 4371-4383. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru217>

5. CALIDAD DE FRUTOS DE JITOMATE TRATADOS CON BRASINOLIDA

5.1 Resumen

Los brasinoesteroides regulan el metabolismo de las plantas e intervienen en diversos procesos del desarrollo del fruto. Se determinó la influencia de la aplicación de brasinolida de manera foliar en tomate CID F1 en dos frecuencias 15 y 21 días (DA), cinco concentraciones 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mg·L⁻¹ y un testigo 0.00 mg·L⁻¹, sobre la calidad de los frutos cosechados. Se registraron peso de fruto (g), tamaño (mm), color (LCh), materia seca (%), sólidos solubles (°Brix), firmeza (kg·cm⁻²), acidez titulable (%), capacidad antioxidante (µg·g⁻¹) y contenido de vitamina C (µg·g⁻¹). Se observó que 0.25 mg·L⁻¹ 21 DA obtuvo mayor peso de fruto con 148.81 g. 0.15 mg·L⁻¹ generó más materia seca con 5.85 %. 0.05 mg·L⁻¹ produjo frutos más largos con 78.62 mm. 0.20 mg·L⁻¹ 21 DA generó frutos más angostos con 56.42 mm de diámetro ecuatorial, mientras que 0.15 mg·L⁻¹ 15 DA generó frutos más anchos con 69.71 mm. Los frutos de los tratamientos a 15 DA fueron 0.71 más luminosos que a 21 DA; 0.10 mg·L⁻¹ obtuvo valor más alto en croma con 32.87 y 0.25 mg·L⁻¹ generó frutos menos saturados con 29.92. 0.10 mg·L⁻¹ obtuvo el valor más alto para h con 59.32, mientras que 0.05 y 0.25 mg·L⁻¹ tuvieron el valor más bajo. Los frutos a 15 DA presentaron 8.34 % más capacidad antioxidante que a 21 DA; 0.25 mg·L⁻¹ generó 28.39 % más capacidad antioxidante que el testigo. 0.05 mg·L⁻¹ obtuvo el mayor contenido de vitamina C con 746.36 µg·g⁻¹. 0.15 mg·L⁻¹ presentó mayor contenido de sólidos solubles con 5.1 °Brix. No hubo diferencias en el contenido de acidez. 0.05 mg·L⁻¹ con 0.29 kg·cm⁻² fue la firmeza más alta. La aplicación de brasinolida indujo mejores cualidades postcosecha de los frutos de tomate, principalmente aumentó los sólidos solubles, el ácido ascórbico y mejoró la firmeza.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., ácido ascórbico, brasinoesteroides, antioxidante.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Romy Sinahi Fonseca Salvador

Director de Tesis: Dr. Rogelio Castro Brindis

5.2 Abstract

Brassinosteroids regulate plant metabolism as they are involved in various processes of fruit development. In this experiment, the quality of tomato fruit was determined from tomato plants CID F1 treated with foliar brassinolide applications at two frequencies 15 and 21 days (DA), five concentrations 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mg·L⁻¹ and a control 0.0 mg·L⁻¹. The variables recorded were fruit weight (g), size (mm), color (LCh), dry matter (%), soluble solids (°Brix), firmness (kg·cm⁻²), titratable acidity (%), antioxidant capacity (µg·g⁻¹) and vitamin C content (µg·g⁻¹). It was observed that 0.25 mg·L⁻¹ 21 DA obtained higher fruit weight with 148.81 g. 0.15 mg·L⁻¹ generated more dry matter with 5.85 %. 0.05 mg·L⁻¹ produced longer fruits with 78.62 mm. 0.20 mg·L⁻¹ 21 DA generated narrower fruits with 56.42 mm of equatorial diameter, while 0.15 mg·L⁻¹ 15 DA generated wider fruits with 69.71 mm. The fruits of the treatments at 15 DA were 0.71 more luminous than at 21 DA; 0.10 mg·L⁻¹ obtained the highest value in chroma with 32.87 and 0.25 mg·L⁻¹ generated less saturated fruits with 29.92. 0.10 mg·L⁻¹ obtained the highest value for h with 59.32, while 0.05 and 0.25 mg·L⁻¹ had the lowest value. Fruits at 15 DA presented 8.34 % more antioxidant capacity than at 21 DA; 0.25 mg·L⁻¹ generated 28.39 % more antioxidant capacity than the control. 0.05 mg·L⁻¹ obtained the highest vitamin C content with 746.36 µg·g⁻¹. 0.15 mg·L⁻¹ presented the highest soluble solids content with 5.1 °Brix. There were no differences in acidity content. 0.05 mg·L⁻¹ with 0.29 kg·cm⁻² was the highest firmness. Exogenous application of brassinolide induced better postharvest qualities of tomato fruits, mainly increased soluble solids, ascorbic acid, and improved firmness.

Key words: *Solanum lycopersicum* L., ascorbic acid, brassinosteroids, antioxidant.

Thesis, Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Romy Sinahi Fonseca Salvador

Advisor: Dr. Rogelio Castro Brindis

5.3 Introducción

El fruto de tomate es altamente valorado por su importancia económica y nutricional en el mercado fresco y agroindustrial, la elección del cultivar de tomate y las prácticas postcosecha implementadas por la industria están diseñadas para reducir la pérdida de cultivos y alargar la vida útil, además, el gusto y el sabor son componentes clave de la comercialización del tomate (Beckles, 2012).

Las cualidades del fruto se deben a cambios metabólicos regulados por genes estructurales y reguladores transcripcionales (Zhu et al., 2022) que le otorgan una apariencia colorida y sabrosa, al ser una fruta climatérica, su maduración requiere de la intervención de la fitohormona etileno. La expresión regulada de miles de genes controla el ablandamiento de la fruta, así como la acumulación de pigmentos, azúcares, ácidos y compuestos volátiles (Klee & Giovannoni, 2011).

El consumo regular de tomates se ha asociado con un menor riesgo de enfermedades crónico-degenerativas debido a que contienen moléculas antioxidantes que promueven la salud como los carotenoides, principalmente el licopeno, el ácido ascórbico, la vitamina E y compuestos fenólicos, particularmente los flavonoides (Frusciante et al., 2007; Quinet et al., 2019).

El rendimiento y la calidad del tomate depende de factores agronómicos como el tamaño de la cama de siembra y el espaciamiento, la aplicación de fertilizantes, la poda, la selección del cultivar, el riego, el estado de madurez y el manejo postcosecha (Arah et al., 2015; Luitel et al., 2012).

El estrés abiótico, como la exposición prolongada a altas temperaturas, puede desencadenar cambios que influyen en el desarrollo de las plantas, incluido el crecimiento vegetativo y la reproducción, también puede afectar la calidad del fruto de tomate al alterar propiedades físicas específicamente, el tamaño, el color, la composición nutricional y los atributos sensoriales además las altas temperaturas aceleran la maduración y pueden provocar una rápida sobremaduración al aumentar la tasa de transpiración, respiración y producción de etileno (Thole et al., 2021).

Los brasinoesteroides (BR) se encuentran presentes en todas las partes de la planta, como la raíz, el brote, las hojas, el polen, las flores, las semillas y el cambium vascular. Los BR no pueden considerarse señales de larga distancia, porque son incapaces de ser transportados entre la raíz y el brote o de un órgano a otro (Siddiqui et al., 2018). Los BR regulan muchos procesos específicos del desarrollo, incluida la maduración del fruto, parecen estar implicados en la modulación de la acumulación de pigmentos carotenoides, mayor contenido de sólidos solubles, azúcares solubles y ácido ascórbico, atributos importantes de calidad sensorial y nutricional de los frutos de tomate (Liu et al., 2014). Los BR se sintetizan más activamente en los órganos jóvenes y en desarrollo, su potencial para regular la maduración de la fruta está asociado con un aumento en la producción de etileno (Divi & Krishna, 2009).

La aparente acumulación de BR en los frutos plantea la posibilidad de un papel específico durante la maduración del fruto del tomate debido a que se producen cambios morfológicos y bioquímicos, que incluyen niveles de BR gradualmente elevados, acumulación de azúcar y carotenoides, mayor liberación de etileno, volátiles de sabor, y firmeza reducida (Hu et al., 2020).

Debido a que la influencia de los BR sobre el metabolismo de las plantas es una opción para el aumento de la productividad de los cultivos al potencializar su crecimiento y desarrollo. En este estudio se analizaron los cambios ocurridos en las cualidades del fruto de tomate por efecto de la aplicación exógena de brasinolida (BL) durante el desarrollo de las plantas, con el objetivo de determinar la influencia de este compuesto en la mejora de la calidad del tomate.

5.4 Materiales y métodos

En un diseño experimental en bloques completamente al azar en parcelas divididas, se aplicó de manera foliar brasinolida (0.01 % SL presentación original) en dos frecuencias, 15 y 21 días (DA) y cinco concentraciones 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mg·L⁻¹ y un testigo 0.00 mg·L⁻¹ con tres repeticiones de tomate tipo saladette (*Solanum lycopersicum* L.) Cid F1. El experimento se estableció en el área de invernaderos en el campo agrícola experimental del Departamento de Fitotecnia (CAEF) en la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México. Durante el desarrollo del cultivo se monitoreó la

temperatura dentro del invernadero mediante HOBO MX2301A, las temperaturas máximas registradas variaron de 41-36 °C y las mínimas de 10-2 °C durante los meses de junio a noviembre. Cada unidad experimental se colocó a 0.3 m de separación entre planta, aproximadamente, 3.0 plantas·m⁻², se utilizó arenilla de tezontle en contenedores de polietileno negro tipo bolsa de 40 x 40 calibre 600. Para cubrir con los requerimientos nutricionales del cultivo se aplicó solución nutritiva Steiner con conductividad eléctrica de 2.0 y pH de 5.5.

Las plantas se condujeron mediante poda a un tallo y se despuntaron hasta alcanzar ocho racimos de fruto. La muestra consistió en un fruto al azar de los racimos centrales por planta muestreada. Las variables que se registraron fueron peso de fruto (g), tamaño de fruto (diámetro polar (DP) y diámetro ecuatorial (DE)), color, materia seca (%), sólidos solubles (°Brix), firmeza (kg·cm⁻²), acidez titulable (%), capacidad antioxidante (µg·g⁻¹) y contenido de vitamina C (µg·g⁻¹).

El peso de fruto se registró mediante balanza digital, el tamaño se midió con un vernier digital, para el análisis de color se utilizó un espectrofotómetro de esfera X-Rite en el sistema CIE LCh donde L representa la luminosidad en escala de 0-100, C representa el croma en escala 0-100, h indica el matiz va desde 0° a 360°.

El peso seco (g) de frutos se obtuvo en estufa a 70 °C hasta peso constante (Velasco et al., 2016), el porcentaje de materia seca se calculó mediante la fórmula:

$$MS (\%) = \frac{PS}{PH} \times 100$$

donde MS es el porcentaje de materia, PS es el peso seco (g) y PH es el peso húmedo (g) de cada estructura.

Los sólidos solubles se determinaron mediante un refractómetro digital PAL-1. La firmeza (kg·cm⁻²), se determinó por medio de penetrómetro MT 150 L. Para la determinación de acidez titulable se utilizaron 5 g de pulpa licuados en 30 mL de agua destilada; posteriormente, se obtuvo un extracto filtrado, del cual se tomó 10 mL de alícuota y se añadieron dos gotas de indicador fenolftaleína. A continuación, se tituló con hidróxido de

sodio 0.1 N (AOAC, 1985). El porcentaje de acidez se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$\text{acidez (\%)} = \frac{(\text{mL NaOH})(N)(\text{Meq ácido})(V)(100)}{(Pf)(A)}$$

donde N es la normalidad de NaOH, Meq ácido son los miliequivalentes del ácido (0.064 ácido cítrico), V es el volumen total del extracto (mL), Pf es el peso de fruto (g) y A es la alícuota (mL).

La capacidad antioxidante ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) se determinó mediante el método ABTS (Ozgen et al., 2006), para ello, se homogeneizaron 0.1 g de pulpa en 5 mL de alcohol etílico al 70 % y se dejaron reposar durante 24 h, del extracto se tomó 100 μL para añadirles 3.9 mL de ABTS en solución reguladora acetato (pH 4.5), se dejó reposar durante 2 h en oscuridad; posteriormente, se leyó en espectrofotómetro a 734 nm. De la curva patrón con trolox se obtiene la siguiente ecuación de regresión lineal:

$$y = 0.63875 + (-0.03227)(x)$$

de la cual se obtiene la fórmula para el cálculo de concentración de capacidad antioxidante:

$$CA = \frac{(y + 0.63875)(V)(1)}{(0.03227)(A)(Ph)}$$

donde CA es la capacidad antioxidante ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), y es la absorbancia (nm), V es el volumen total del extracto (mL), A es la alícuota (mL), Ph es el peso del fruto (g).

El contenido de vitamina C ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) se obtuvo al homogeneizar 0.5 g de pulpa en frío con ácido tricloroacético al 20 %, después de reposar 5 min en hielo, se centrifugó a 17 000 rpm por 20 min a 5 °C. Del sobrenadante se tomaron 400 μL se añadieron 3.2 mL de agua bidestilada y 400 μL de folin después de agitación se dejó reposar durante 10 min; posteriormente, se leyó en espectrofotómetro a 760 nm (Jagota & Dani, 1982). A partir de la curva patrón de ácido ascórbico se obtuvo la ecuación de regresión lineal:

$$y = -0.01881051 + 0.0072823(x)$$

de la cual se obtiene la fórmula para el cálculo del contenido de Vitamina C:

$$VC = \frac{(y + 0.01881051)(V)(1)}{(0.0072823)(A)(Ph)}$$

donde VC es el contenido de vitamina C ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), y es la absorbancia (nm), V es el volumen total del extracto (mL), A es la alícuota (mL), Ph es el peso del fruto (g).

Se realizó un análisis estadístico en el programa SAS Studio, se utilizó la codificación para un arreglo en parcelas divididas completamente al azar. Con los datos obtenidos se hizo un análisis de varianza para cada variable y una prueba de separación de medias con el método de Tukey ($\alpha=0.05$).

5.5 Resultados y discusión

El mayor peso de fruto se observó en las concentraciones 0.05 y 0.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con 146.65 y 142.77 g, respectivamente, por su parte, el testigo presentó frutos de 134.73 g, 8.55 % menos gramos que la concentración 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. En cuanto a las interacciones, 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 15 DA y 0.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 21 DA produjeron frutos de mayor peso con 148.81 y 149.21 g, respectivamente (Cuadro 8). Por otro lado, la concentración 0.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ obtuvo el mayor porcentaje de materia seca con 5.85 %, mientras que el menor porcentaje fue 5.32 % correspondiente a la concentración 0.10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. En los tomates, la fruta es el órgano de demanda más fuerte y los fotosintatos se distribuyen a las frutas a un ritmo elevado, la distribución de materia seca a los frutos depende de la fuerza de la demanda de un solo fruto y del número de frutos por planta, a su vez, la magnitud de la fuerza de la demanda determina la proporción de distribución de los fotosintatos en una planta (Higashide, 2022). La aplicación de BL propició una mayor cantidad de fotosintatos disponibles para su distribución hacia los órganos sumidero, lo que generó frutos de mayor peso y contenido de materia seca.

Por lo tanto, la cantidad total de biomasa producida por las plantas de este estudio dependió, en parte, de la cantidad de luz disponible y de la eficiencia de captación que lograron interceptar las plantas. En ese sentido, los BR desempeñan un papel importante en el mantenimiento de la eficiencia del PS II al estabilizar la proteína D1 además de prevenir la pérdida de pigmentos fotosintéticos, elevar la eficiencia de la fijación

fotosintética de carbono y actuar en diferentes niveles de reacciones de luz y oscuridad que conducen a una mayor síntesis de carbohidratos (Siddiqui et al., 2018).

En cuanto al tamaño de frutos, las concentraciones 0.05 y 0.25 mg·L⁻¹ produjeron frutos más largos con 78.62 y 77.81 mm, respectivamente, de diámetro polar. Con la interacción 0.20 mg·L⁻¹ 21 DA se obtuvieron frutos más angostos con 56.42 mm de diámetro ecuatorial mientras que 0.15 mg·L⁻¹ 15 DA originó frutos más anchos con 69.71 mm. Similar a lo encontrado en esta investigación, la aplicación de homobrasinolida (0.12 g i.a. ha⁻¹) generó aumento en la longitud del fruto, anchura del fruto, peso del fruto y rendimiento del fruto (Sridhara et al, 2021).

A tal efecto, se encontró que la codificación de proteínas similares a BZR1 a través del gen de transcripción BZR1.7 promovió el alargamiento del fruto de tomate al regular positivamente la expresión del gen SUN, un regulador clave del alargamiento del fruto (Yu et al., 2022). En tomate saladette, un aspecto importante a nivel comercial es la forma del fruto, por lo que las plantas tratadas con BL, podrían generar frutos más valorados en el mercado. La participación de la señalización de BR en la regulación del desarrollo del fruto en tomates también se estudió en mutantes insensibles a BR. Las plantas insensibles a BR exhibieron negativamente niveles de expresión de genes específicos del crecimiento del fruto y del desarrollo celular, lo que resultó en una reducción del tamaño y número de células (Mumtaz et al., 2022). Esto respalda que la aplicación exógena de BR promueve las características de calidad de las frutas como se observó en plantas tratadas con BL, mientras que su inhibición produce el resultado opuesto.

La mejora de las características de color se observó en los tratamientos aplicados a 15 DA, cuyos frutos fueron 0.71 más luminosos que los aplicados a 21 DA. El croma más alto lo generó 0.10 mg·L⁻¹ con 32.87 mientras que 0.25 mg·L⁻¹ fue el valor más bajo en saturación con 29.92. El valor para h más alto se obtuvo con la concentración 0.10 mg·L⁻¹ con 59.32 y más bajo en la concentración 0.05 y 0.25 mg·L⁻¹ con 55.61 y 55.80, es decir, presentaron una tonalidad más roja asociada con el carotenoide, licopeno presente en los tomates maduros. La biosíntesis de este compuesto se ve afectada por las condiciones ambientales, si la temperatura de los frutos supera los 30 °C, se inhibe la síntesis de licopeno (Brandt et al., 2006). Sin embargo, aunque las altas temperaturas

repercutieron en el desarrollo de frutos de las plantas testigo, la aplicación de BL incentivo sus propiedades sensoriales.

Adicionalmente, los frutos a 15 DA presentaron 8.34 % más capacidad antioxidante que los frutos a 21 DA (Cuadro 9), por otra parte, la concentración 0.25 mg·L⁻¹ generó 28.39 % más capacidad antioxidante que el testigo. A su vez, las interacciones 0.10, 0.15 y 0.25 mg·L⁻¹ 15 DA generaron mayor capacidad antioxidante con 17 533.91, 17 330.83 y 18 603.37 µg·g⁻¹. En relación con el contenido de vitamina C, todos los tratamientos produjeron cantidades superiores al testigo. La concentración 0.05 mg·L⁻¹ obtuvo 29.68 % más vitamina C en comparación con el testigo, el cual obtuvo 575.53 µg·g⁻¹. Como se observó en los frutos de plantas tratadas con BL, BR tiene la capacidad de estimular la tolerancia al estrés térmico por medio del sistema antioxidante, al coadyuvar a las células en el metabolismo de las especies reactivas de oxígeno (ROS) en los tejidos, con lo cual se infiere mayor estabilidad de la membrana y las propiedades de la pared celular, disminución de la muerte celular y reducción de pérdidas económicas por BER.

Sobre el incremento de la capacidad antioxidante en frutos de plantas tratadas con BR, la aplicación de 24-epibrasinolida en frutos de tomate de híbrido BRS Montese además de inhibir el desarrollo de BER y mejorar las características de fruto en diámetro, longitud y el peso fresco también aumentó la actividad de las tres enzimas antioxidantes: ascorbato peroxidasa, catalasa, y superóxido dismutasa. Asimismo, aumentó el contenido de ácido ascórbico y disminuyó el contenido de peróxido de hidrógeno en tejido de frutos (Riboldi et al., 2019). El aumento del contenido de ácido ascórbico en plantas tratadas con BL también mejoró la adaptación al estrés térmico debido a que este metabolito actúa como antioxidante contra las ROS y protegen el sistema de su efecto dañino (Hayat et al., 2012).

En definitiva, BR estimula el mecanismo antioxidante de las plantas tanto en frutos como en hojas, pues los efectos perjudiciales de las altas temperaturas (40/30 °C) sobre el crecimiento de las plantas de tomate fueron atenuados por la aplicación de 24-epibrasinolida al aumentar la eficiencia de la carboxilación y mejorar los sistemas de enzimas antioxidantes en las hojas como la superóxido dismutasa, la ascorbato peroxidasa, la guaiacol peroxidasa y la catalasa (Ogweno et al., 2008).

Esto lleva a fortalecer las defensas de las plantas, aumentar su capacidad para resistir el estrés ambiental y lograr cosechas óptimas, así como producir frutos con cualidades sensoriales y nutricionales superiores.

Cuadro 8. Peso de fruto (PF), materia seca (MS), diámetro polar (DP), diámetro ecuatorial (DE) y color (LCh) de frutos procedentes de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinólida.

| Tratamiento | PF (g) | MS (%) | DP (mm) | DE (mm) | L | C | h | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|---------|---------|----|-------|----|-------|----|-------|---|-------|----|-------|----|
| F | C | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | 137.85 | a | 5.49 | a | 75.47 | a | 63.11 | a | 37.84 | a | 31.83 | a | 57.27 | a |
| 21 | | 139.68 | a | 5.57 | a | 75.60 | a | 61.00 | a | 37.13 | b | 31.28 | a | 56.62 | a |
| DMSH | | 5.67 | | 0.08 | | 3.16 | | 2.71 | | 0.70 | | 1.64 | | 3.39 | |
| | 0.00 | 134.73 | bc | 5.51 | ab | 75.81 | ab | 60.89 | b | 37.01 | a | 31.31 | ab | 56.02 | ab |
| | 0.05 | 146.65 | a | 5.58 | ab | 78.62 | a | 63.99 | ab | 37.55 | a | 32.01 | ab | 55.61 | b |
| | 0.10 | 140.97 | ab | 5.32 | b | 76.24 | ab | 61.53 | ab | 37.97 | a | 32.87 | a | 59.32 | a |
| | 0.15 | 133.38 | c | 5.85 | a | 71.77 | c | 64.42 | a | 37.09 | a | 31.51 | ab | 58.10 | ab |
| | 0.20 | 134.11 | c | 5.50 | ab | 72.96 | bc | 57.74 | c | 37.66 | a | 31.71 | ab | 56.86 | ab |
| | 0.25 | 142.77 | a | 5.41 | ab | 77.81 | a | 63.78 | ab | 37.65 | a | 29.92 | b | 55.80 | b |
| DMSH | | 6.62 | | 0.48 | | 3.93 | | 3.12 | | 2.39 | | 2.23 | | 3.34 | |
| 15 | 0.00 | 133.66 | bc | 5.46 | a | 76.27 | a | 60.56 | bc | 37.05 | a | 31.96 | a | 56.65 | a |
| | 0.05 | 148.81 | a | 5.62 | a | 77.00 | a | 65.90 | ab | 37.73 | a | 31.95 | a | 57.08 | a |
| | 0.10 | 143.61 | ab | 5.07 | a | 77.77 | a | 62.45 | b | 38.79 | a | 33.40 | a | 58.49 | a |
| | 0.15 | 139.86 | ab | 5.66 | a | 74.25 | ab | 69.71 | a | 37.81 | a | 31.87 | a | 57.78 | a |
| | 0.20 | 124.85 | c | 5.44 | a | 72.27 | b | 59.06 | c | 38.06 | a | 31.63 | a | 57.62 | a |
| | 0.25 | 136.32 | bc | 5.68 | a | 75.24 | ab | 61.00 | bc | 37.62 | a | 30.17 | a | 56.03 | a |
| 21 | 0.00 | 135.80 | bc | 5.57 | a | 75.35 | ab | 61.22 | bc | 36.97 | a | 30.67 | a | 55.40 | a |
| | 0.05 | 144.48 | ab | 5.53 | a | 80.25 | a | 62.07 | bc | 37.38 | a | 32.06 | a | 54.13 | a |
| | 0.10 | 138.34 | ab | 5.57 | a | 74.71 | ab | 60.62 | bc | 37.14 | a | 32.34 | a | 60.14 | a |
| | 0.15 | 126.89 | c | 6.04 | a | 69.29 | b | 59.12 | c | 36.37 | a | 31.15 | a | 58.42 | a |
| | 0.20 | 143.36 | ab | 5.56 | a | 73.64 | ab | 56.42 | c | 37.27 | a | 31.80 | a | 56.10 | a |
| | 0.25 | 149.21 | a | 5.14 | a | 80.38 | a | 66.56 | ab | 37.67 | a | 29.68 | a | 55.56 | a |
| DMSH | | 11.71 | | 1.02 | | 7.49 | | 6.03 | | 5.16 | | 4.34 | | 6.39 | |
| CVf % | | 2.85 | | 1.02 | | 2.92 | | 3.04 | | 1.30 | | 3.62 | | 4.15 | |
| CVc % | | 2.63 | | 4.74 | | 2.86 | | 2.77 | | 3.52 | | 3.90 | | 3.23 | |

DMSH: Diferencia Mínima Significativa Honesta; F: Frecuencia; C: Concentración; CVf: Coeficiente de variación para frecuencia; CVc: Coeficiente de variación para concentración; Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

El contenido de sólidos solubles fue mayor en las concentraciones 0.15 y 0.20 mg·L⁻¹, con 5.1 y 5.0 °Brix, respectivamente, mientras que el menor contenido lo obtuvo el testigo con 4.6 °Brix. De manera similar a los hallazgos de este estudio, la aplicación de BL a tomates promovió su maduración, aumentó los azúcares solubles, el ácido ascórbico, el contenido de licopeno, la tasa de respiración y la producción de etileno, mientras que los frutos tratados con brasinazol (un inhibidor de la biosíntesis de BR), mostraron retraso en la maduración, lo que sugiere que BR desempeña un papel en el desarrollo de los atributos de calidad de la fruta y en la maduración mediada por etileno (Zhu et al., 2015).

Cuadro 9. Capacidad antioxidante (CA), contenido de vitamina C, acidez, firmeza y °Brix de frutos procedentes de plantas de tomate CID F1 tratadas con brasinolida.

| Tratamiento | | CA | Vitamina C | Acidez | Firmeza | °Brix | | | | | |
|-------------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|------------------------------------|-------|---|-------|----|------|-----|
| F | C | ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) | ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) | (%) | ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) | | | | | | |
| 15 | | 15494.00 | a | 699.97 | a | 2.28 | a | 0.24 | a | 4.9 | a |
| 21 | | 14201.00 | b | 695.20 | a | 2.23 | a | 0.26 | a | 4.8 | a |
| DMSH | | 179.39 | | 49.42 | | 0.27 | | 0.05 | | 0.4 | |
| | 0.00 | 13209.00 | d | 575.53 | c | 2.29 | a | 0.22 | b | 4.6 | b |
| | 0.05 | 13808.00 | cd | 746.36 | a | 2.19 | a | 0.29 | a | 4.9 | ab |
| | 0.10 | 15551.00 | b | 738.34 | a | 2.13 | a | 0.25 | ab | 4.8 | ab |
| | 0.15 | 15503.00 | b | 723.19 | a | 2.39 | a | 0.24 | ab | 5.1 | a |
| | 0.20 | 14053.00 | c | 672.66 | b | 2.40 | a | 0.27 | ab | 5.0 | a |
| | 0.25 | 16959.00 | a | 729.43 | a | 2.12 | a | 0.23 | ab | 4.9 | ab |
| DMSH | | 737.62 | | 38.57 | | 0.33 | | 0.06 | | 0.3 | |
| 15 | 0.00 | 13074.01 | d | 581.83 | b | 2.37 | a | 0.21 | b | 4.7 | bcd |
| | 0.05 | 13208.74 | d | 714.36 | a | 2.30 | a | 0.26 | ab | 4.7 | bcd |
| | 0.10 | 17533.91 | a | 722.93 | a | 2.03 | a | 0.21 | b | 4.8 | bcd |
| | 0.15 | 17330.83 | a | 711.00 | a | 2.29 | a | 0.22 | b | 5.2 | ab |
| | 0.20 | 13213.95 | d | 717.23 | a | 2.51 | a | 0.30 | ab | 4.8 | bcd |
| | 0.25 | 18603.37 | a | 752.50 | a | 2.17 | a | 0.24 | ab | 5.4 | a |
| 21 | 0.00 | 13344.61 | cd | 569.23 | b | 2.21 | a | 0.23 | ab | 4.5 | cd |
| | 0.05 | 14406.63 | bcd | 778.36 | a | 2.08 | a | 0.32 | a | 5.1 | ab |
| | 0.10 | 13568.60 | cd | 753.75 | a | 2.23 | a | 0.29 | ab | 4.7 | bcd |
| | 0.15 | 13675.87 | cd | 735.38 | a | 2.49 | a | 0.26 | ab | 4.9 | abc |
| | 0.20 | 14892.71 | bc | 628.09 | b | 2.28 | a | 0.23 | ab | 5.2 | ab |
| | 0.25 | 15314.81 | b | 706.36 | a | 2.07 | a | 0.22 | b | 4.3 | d |
| DMSH | | 1582.87 | | 75.55 | | 0.58 | | 0.10 | | 0.6 | |
| CVf % | | 0.84 | | 4.94 | | 8.26 | | 13.64 | | 5.52 | |
| CVc % | | 2.74 | | 3.05 | | 8.08 | | 12.15 | | 3.70 | |

DMSH: Diferencia Mínima Significativa Honesta; F: Frecuencia; C: Concentración; CVf: Coeficiente de variación para frecuencia; CVc: Coeficiente de variación para concentración; Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

En cuanto al porcentaje de acidez, no se encontraron diferencias significativas. Finalmente, la concentración más baja $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ presentó la firmeza más alta con $0.29 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$, esa misma concentración a 21 DA obtuvo $0.32 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$, el resto de los tratamientos mostraron una firmeza similar al testigo. Se observó una mejora en la firmeza en frutos de plantas aplicadas a baja concentración de BL. Por consiguiente, se infiere un aumento en su contenido de calcio, puesto que este macronutriente está presente en las paredes celulares y otorga mayor estructura y resistencia (Demidchik et al., 2018). Esto implica que los frutos de tomate de plantas tratadas con BL pueden tener una mayor capacidad para resistir los daños, sobre todo durante su manejo postcosecha.

5.6 Conclusión

La aplicación de BL durante el desarrollo de las plantas de tomate contribuyó en la producción de frutos más atractivos a nivel comercial. La BL mejoró significativamente cualidades sensoriales y nutricionales del fruto, principalmente la capacidad antioxidante, el contenido de sólidos solubles, el contenido de ácido ascórbico y la firmeza. Lo que se traduce, en el fortalecimiento de las defensas vegetales, la estimulación en su capacidad para adaptarse al estrés ambiental, el incremento en productividad y mejores características postcosecha.

5.7 Literatura citada

- AOAC. (1985). *Official methods of analysis*. Association of Official Analytical Chemists.
- Arah, I. K, Amaglo H., Kumah E. K., & Ofori H. (2015). Preharvest and postharvest factors affecting the quality and shelf life of harvested tomatoes: A mini review. *International Journal of Agronomy*, 2015, Artículo 478041 <https://doi.org/10.1155/2015/478041>
- Beckles, D. M. (2012). Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 63(1), 129-140. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.05.016>
- Brandt, S., Pék, Z., Barna, É., Lugasi, A., & Helyes, L. (2006). Lycopene content and colour of ripening tomatoes as affected by environmental conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(4), 568-572. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2390>
- Demidchik, V., Shabala, S., Isayenkov, S., Cuin, T. A., & Pottosin, I. (2018). Calcium transport across plant membranes: mechanisms and functions. *New Phytologist*, 220(1), 49-69. <https://doi.org/10.1111/nph.15266>
- Divi, U. K., & Krishna, P. (2009). Brassinosteroid: a biotechnological target for enhancing crop yield and stress tolerance. *New Biotechnology*, 26(3-4), 131-136. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2009.07.006>
- Frusciante, L., Carli, P., Ercolano, M. R., Pernice, R., Di Matteo, A., Fogliano, V., & Pellegrini, N. (2007). Antioxidant nutritional quality of tomato. *Molecular nutrition & Food Research*, 51(5), 609-617. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200600158>
- Hayat, S., Alyemeni, M. N., & Hasan, S. A. (2012). Foliar spray of brassinosteroid enhances yield and quality of *Solanum lycopersicum* under cadmium stress. *Saudi Journal Biological Sciences*, 19(3), 325-335. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.03.005>
- Higashide, T. (2022). Review of dry matter production and growth modelling to improve the yield of greenhouse tomatoes. *The Horticulture Journal*, 91(3), 247-266. <https://doi.org/10.2503/hortj.UTD-R019>
- Hu, S., Liu, L., Li, S., Shao, Z., Meng, F., Liu, H., Duan, W., Liang, D., Zhu, C., Xu, T., & Wang, Q. (2020). Regulation of fruit ripening by the brassinosteroid biosynthetic gene SICYP90B3 via an ethylene-dependent pathway in tomato. *Horticulture Research*, 7(163), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-00383-0>
- Jagota, S. K., & Dani, H. M. (1982). A new colorimetric technique for the estimation of vitamin C using Folin phenol reagent. *Analytical Biochemistry*, 127(1), 178-182. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(82\)90162-2](https://doi.org/10.1016/0003-2697(82)90162-2)
- Klee, H. J., & Giovannoni, J. J. (2011). Genetics and control of tomato fruit ripening and quality attributes. *Annual Review of Genetics*, 45(1), 41-59. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-110410-132507>
- Liu, L., Jia, C., Zhang, M., Chen, D., Chen, S., Guo, R., Guo, D., & Wang, Q. (2014). Ectopic expression of a BZR1-1D transcription factor in brassinosteroid signalling

- enhances carotenoid accumulation and fruit quality attributes in tomato. *Plant Biotechnology Journal*, 12(1), 105–115. <https://doi.org/10.1111/pbi.12121>
- Luitel, B. P., Adhikari, P. B., Yoon, C. S., & Kang, W. H. (2012). Yield and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars established at different planting bed size and growing substrates. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 53(2), 102-107. <https://doi.org/10.1007/s13580-012-0103-6>
- Mumtaz, M. A., Li, F., Zhang, X., Tao, J., Ge, P., Wang, Y., Wang, Y., Gai, W., Dong, H., & Zhang, Y. (2022). Altered brassinolide sensitivity¹ regulates fruit size in association with phytohormones modulation in tomato. *Horticulturae*, 8(11), Artículo 1008. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111008>
- Ogweno, J. O., Song, X. S., Shi, K., Hu, W. H., Mao, W. H., Zhou, Y. H., Yu, J. Q., & Nogués, S. (2008). Brassinosteroids alleviate heat-induced inhibition of photosynthesis by increasing carboxylation efficiency and enhancing antioxidant systems in *Lycopersicon esculentum*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 27, 49-57. <https://doi.org/10.1007/s00344-007-9030-7>
- Ozgen, M., Reese, R. N., Tulio Jr., A. Z., Scheerens, J. C., & Miller, R. (2006). Modified 2,2-azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid (ABTS) method to measure antioxidant capacity of selected small fruits and comparison to ferric reducing antioxidant power (FRAP) and 2,2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) methods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(4), 1151-1157. <https://doi.org/10.1021/jf051960d>
- Quinet, M., Angosto, T., Yuste-Lisbona, F. J., Blanchard-Gros, R., Bigot, S., Martinez, J. P., & Lutts, S. (2019). Tomato fruit development and metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 10, Artículo 1554. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01554>
- Riboldi, L. B., Gaziola, S. A., Azevedo, R. A., de Freitas, S. T., & de Camargo e Castro, P. R. (2019). 24-Epibrassinolide mechanisms regulating blossom-end rot development in tomato fruit. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38, 812–823. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9892-x>
- Siddiqui, H., Hayat, S., & Bajguz, A. (2018). Regulation of photosynthesis by brassinosteroids in plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40, Artículo 59. <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2639-2>
- Sridhara, S., Ramesh, N., Gopakkali, P., Paramesh, V., Tamam, N., Abdelbacki, A., Elansary, H. O., El-Sabrou, A. M., & Abdelmohsen, S. (2021). Application of homobrassinolide enhances growth, yield and quality of tomato. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(8), 4800–4806. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.05.008>
- Thole, V., Vain, P., & Martin, C. (2021). Effect of elevated temperature on tomato post-harvest properties. *Plants*, 10(11), Artículo 2359. <https://doi.org/10.3390/plants10112359>
- Velasco Alvarado, M. J., Castro Brindis, R., Castillo González, A. M., Avitia García, E., Sahagún Castellanos, J., & Lobato Ortiz, R. (2016). Composición mineral, biomasa y rendimiento en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) injertado. *Interciencia*, 41(10), 703-708.

- Yu, T., Ai, G., Xie, Q., Wang, W., Song, J., Wang, J., Tao, J., Zhang, X., Hong, Z., Lu, Y., Ye, J., Zhang, Y., Zhang, J., & Ye, Z. (2022). Regulation of tomato fruit elongation by transcription factor BZR1.7 through promotion of SUN gene expression. *Horticulture Research*, 9, Artículo uhac121. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac121>
- Zhu, F., Wen, W., Cheng, Y., & Fernie, A. R. (2022). The metabolic changes that effect fruit quality during tomato fruit ripening. *Molecular Horticulture*, 2(1), Artículo 2. <https://doi.org/10.1186/s43897-022-00024-1>
- Zhu, T., Tan, W. R., Deng, X. G., Ting, Z., Zhang, D. W., & Lin, H. H. (2015). Effects of brassinosteroids on quality attributes and ethylene synthesis in postharvest tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 100, 196-204. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.09.016>