



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FISIOLOGÍA VEGETAL

CERIO EN GERMINACIÓN Y PRODUCCIÓN DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) EN INVERNADERO

ORLANDO SOBARZO BERNAL

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2018

**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y
DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe ORLANDO SOBARZO BERNAL, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor DRA. LIBIA IRIS TREJO-TÉLLEZ, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Cerio en germinación y producción de tomate (Solanum lycopersicum L.) en invernadero y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 26 de noviembre de 2018

Firma del
Alumno (a)

DRA. LIBIA I. TREJO-TELLEZ
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada “**Cerio en germinación y producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero**”, realizada por el alumno Orlando Sobarzo Bernal bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA:



DRA. LIBIA I. TREJO-TÉLLEZ

ASESOR:



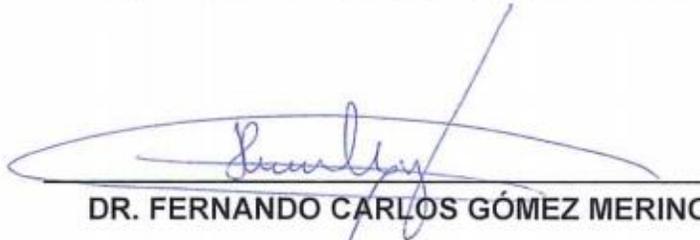
DR. GABRIEL E. ALCÁNTAR GONZÁLEZ

ASESOR:



DR. CRESCENCIANO SAUCEDO VELOZ

ASESOR:



DR. FERNANDO CARLOS GÓMEZ MERINO

Montecillo, Estado de México. Diciembre 2018

Cerio en germinación y producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero

Orlando Sobarzo Bernal, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

El cerio (Ce) es un elemento perteneciente al grupo de las tierras raras que ha mostrado efectos positivos en la germinación, desarrollo y crecimiento en algunos cultivos, sobre todo cuando es suministrado a concentraciones micromolares. En esta investigación se evaluaron los efectos del Ce en germinación y parámetros asociados a ésta, en el crecimiento inicial y durante el ciclo productivo, en indicadores reproductivos y de rendimiento, así como de calidad de fruto en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Vengador, para lo cual se condujeron dos experimentos. El primero se realizó bajo condiciones controladas y consistió en el tratamiento de semillas de tomate con 0, 5, 10 y 15 μM Ce durante la fase de imbibición de 12 h y durante 10 d; posteriormente se evaluaron parámetros de germinación y crecimiento inicial. En este primer ensayo se concluyó que el Ce tiene un efecto estimulante de la germinación y en el crecimiento inicial del vástago en tomate cv. Vengador. En particular, se observó un efecto acondicionante (priming) del Ce en la semilla, reflejado en una mayor ganancia de peso en las semillas tratadas con este elemento lo que indicó mayor absorción de agua. No se observaron efectos significativos en los parámetros de crecimiento de la radícula. En un segundo experimento realizado bajo condiciones de invernadero, se trataron plantas de tomate a partir de su trasplante y hasta la cosecha de frutos del tercer racimo con 0, 5, 10 y 15 μM Ce suministrado en la solución nutritiva empleada para el riego. Los resultados obtenidos permiten concluir que el Ce tiene un efecto bioestimulante en el crecimiento, parámetros reproductivos y de rendimiento, así como en parámetros de calidad de frutos en tomate. Estos efectos benéficos son observados en la mayoría de las variables cuando las plantas se trataron con 10 y 15 μM Ce.

Palabras clave: bioestimulación, calidad de fruto, elementos benéficos, elementos de las tierras raras, hormesis.

**Cerium on germination and production of tomato
(*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse conditions**

Orlando Sobarzo Bernal, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

Cerium (Ce) is an element belonging to the group of rare earths that has shown positive effects on germination, development and growth in some crops, especially when it is supplied at micromolar concentrations. In this study we evaluated the effects of Ce on germination and parameters associated with it, in the initial growth and during the productive cycle, in reproductive and yield parameters, as well as fruit quality in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Vengador. For this, two experiments were conducted. The first experiment was carried out under controlled conditions and consisted in the treatment of tomato seeds with 0, 5, 10 and 15 μM Ce during the imbibition phase of 12 h and for 10 d; later, parameters of germination and initial growth were evaluated. In this first study it was concluded that the Ce has a stimulating effect of germination and on the initial growth of the stem in tomato cv. Vengador. In particular a priming effect of Ce on the seed was observed, reflected in a greater weight gain in the seeds treated with this element which indicated greater water absorption. No significant effects of Ce were observed on the growth parameters of the radicle. In a second experiment carried out under greenhouse conditions, tomato plants were treated from their transplant and until the harvest of fruits of the third bunch, with 0, 5, 10 and 15 μM Ce supplied in the nutrient solution used for irrigation. The results obtained allow us to conclude that the Ce has a biostimulant effect on growth, reproductive and yield parameters, as well as parameters of fruit quality in tomato. These beneficial effects are observed in most of the variables when the plants were treated with 10 and 15 μM Ce.

Key words: biostimulation, fruit quality, beneficial elements, rare earth elements, hormesis.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de postgrado.

Al **Colegio de Postgraduados** por abrirme sus puertas y permitirme hacer uso de sus recursos en especial a los programas de **Fisiología vegetal y Edafología**, por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación académica y fomentar en mí el interés por la investigación científica.

A la **Dra. Libia Iris Trejo Téllez** a la cual valoro de un modo especial por ser como una segunda madre para mí durante esta etapa de mi vida y una persona como pocas, por su amistad, sus consejos, enseñanzas, tanto en lo profesional como en lo personal, sus jalones de orejas cuando fueron necesarios, por el apoyo incondicional en todo momento durante el desarrollo de la presente investigación, por abrirme los ojos y ayudarme a superar los malos momentos por lo que pasé, gracias por exigirme, por señalar el camino hacia el trabajo bien hecho, por creer, confiar en mí y darme la oportunidad de mejorar, por ser parte clave en mi formación y culminación del postgrado y mostrar ser una consejera singular.

Al **Dr. Gabriel Alcántar González, Dr. Fernando Carlos Gómez Merino, Dr. Crescenciano Saucedo Veloz** por su apoyo y enseñanzas durante el desarrollo del proyecto de investigación.

Al cuerpo docente del **COLPOS**, que impartieron sus conocimientos desinteresadamente.

A mis compañeros por sus atenciones, amistad y apoyo, en especial a **Diego, Oliver, Nico, Nayeli, Franco, Fatima, Manuel, Jorgito, Nefertiti, Chamu, Kike**.

A mis padres, **Abelardo Luis Sobarzo Mendivil y Matilde Bernal Escobar** porque a pesar de no estar presentes físicamente, se que procuran mi bienestar desde Sonora y está claro que, si no fuese por el esfuerzo realizado por ellos, mis estudios de maestría no hubiesen sido posibles.

A mis compañeros de equipo en **Kaligaris, Ceverceros e Indians**, por compartir conmigo grandes juegos y el amor por el rey de los deportes, por que a pesar de las victorias y derrotas lo importante es que formamos una gran familia, gracias por hacer de Texcoco mi segundo hogar.

DEDICATORIA

A mis padres:

Abelardo Luis Sobarzo Mendivil y Matilde Bernal Escobar

Por su amor, apoyo, consejos, valores y la motivación constante que me han permitido alcanzar mis metas.

A mi hermano:

Alejandro Sobarzo Bernal

Por estar conmigo y apoyarme siempre y ser mi motivación para mejorar como persona y lograr que veas en mí un ejemplo a seguir.

A mis abuelos:

Ruperto Bernal Rodríguez y Guadalupe Escobar Torres

Por la confianza, consejos y amor brindado durante toda mi vida.

A mi familia en Toluca (**Tías, tíos y primos**):

Por su constante apoyo y cariño.

A mi mascota:

Maggie

Por transmitir tanta alegría y cariño.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
1. BIOESTIMULANTES VEGETALES.....	2
2. ELEMENTOS BENÉFICOS.....	3
3. HORMESIS	6
4. ELEMENTOS DE LAS TIERRAS RARAS.....	9
5. CERIO EN LA AGRICULTURA	10
6. PRODUCCIÓN MUNDIAL Y NACIONAL DE TOMATE	12
7. LITERATURA CITADA.....	13
CAPÍTULO I. CERIO EN LA GERMINACIÓN DE TOMATE	20
1.1. INTRODUCCIÓN.....	20
1.2. OBJETIVO GENERAL.....	21
1.3 HIPÓTESIS GENERAL	21
1.4. MATERIALES Y MÉTODOS	21
1.4.1. Condiciones experimentales	21
1.4.2. Material vegetal	22
1.4.3. Diseño experimental.....	22
1.4.4. Aplicación de tratamientos	22
1.4.5. Variables evaluadas	23
1.4.5.1. Peso de semillas, inicial y posterior a la fase de imbibición	23
1.4.5.2. Índice de germinación (IG)	23
1.4.5.3. Porcentaje relativo de germinación (PRG)	23
1.4.5.4. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG)	24
1.4.5.5. Longitud de vástago y radícula.....	24
1.4.5.6. Crecimiento relativo.....	25
1.4.5.7. Biomasa seca.....	25
1.4.6. Análisis estadístico	25

1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
1.5.1. Incremento porcentual del peso de semilla de tomate después de 12 h de imbibición	26
1.5.2. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG).....	27
1.5.3. Porcentaje de germinación relativa (PGR)	28
1.5.4. Longitud de vástago y radícula.....	29
1.5.5. Crecimiento relativo de vástago y radícula.....	31
1.5.6. Índice de germinación	33
1.5.7. Biomasa seca total, vástago y radícula	35
1.6. CONCLUSIONES.....	38
1.7. LITERATURA CITADA.....	38
CAPÍTULO II. CERIO EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE.....	43
2.1. INTRODUCCIÓN.....	43
2.2. MATERIALES Y MÉTODOS	44
2.2.1. Ubicación del experimento	44
2.2.2. Material vegetal	44
2.2.3. Producción de plántulas y trasplante.....	44
2.2.4. Diseño de tratamientos y diseño experimental.....	45
2.2.5. Riegos	45
2.2.6. Podas y tutorio	45
2.2.7. Variables evaluadas	46
2.2.7.1. Variables de crecimiento y reproductivas	46
2.2.7.2. Variables de rendimiento.....	46
2.2.7.3 Variables de calidad en fruto	47
2.2.8. Análisis estadístico.....	51
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
2.3.1. Variables de crecimiento y reproductivas	52
2.3.1.1. Altura de la planta (AP)	52
2.3.1.2. Diámetro de tallo (DT)	53
2.3.1.3. Número de flores por racimo (NFR)	55
2.3.1.4. Número de flores por planta (NFP).....	56

2.3.1.5. Porcentaje de amarre de fruto (PAF).....	57
2.3.2. Variables de rendimiento.....	59
2.3.2.1. Número de frutos por racimo.....	59
2.3.2.2. Peso promedio por fruto.....	60
2.3.2.3. Rendimiento en peso por racimo y acumulado	62
2.3.3. Variables de calidad en fruto.....	64
2.3.3.1. Diámetro polar y ecuatorial del fruto.....	64
2.3.3.2. Parámetros de color	66
2.3.3.3. Licopeno.....	73
2.3.3.4. Conductividad eléctrica y pH.....	76
2.3.3.5. Porcentaje de pérdida de peso.....	80
2.3.3.6. Firmeza	81
2.3.3.7. Acidez titulable	84
2.3.3.8. Sólidos Solubles Totales (SST).....	87
2.3.3.9. Concentración de vitamina C.....	89
2.4. CONCLUSIONES.....	91
2.5. LITERATURA CITADA.....	92

LISTA DE CUADROS

Página

CAPÍTULO I

Cuadro 1.1.	Tratamientos de cerio a evaluar en la imbibición y germinación de semillas, y en el crecimiento inicial de plántulas de tomate cv. Vengador.....	22
Cuadro 1.2.	Coeficiente de velocidad de germinación de semillas de tomate cv. Vengador, tratadas con diferentes concentraciones de Ce durante la fase de imbibición....	28
Cuadro 1.3.	Porcentaje de germinación relativa de semillas de tomate cv. Vengador, tratadas con diferentes concentraciones de Ce durante la fase de imbibición....	29
Cuadro 1.4.	Crecimiento relativo de radícula obtenido de plántulas tomate cv. Vengador después de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce.....	33
Cuadro 1.5.	Biomasa seca de radícula obtenida de plántulas de tomate cv. Vengador, después de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce.....	35

CAPÍTULO II

Cuadro 2.1.	Altura de plantas de tomate (en m) tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva..	52
Cuadro 2.2.	Diámetro de tallo (en cm), de plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva.....	54
Cuadro 2.3.	Número de flores totales en los racimos 1 a 4 de plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva.....	57

Cuadro 2.4.	Rendimiento total de los racimos 1 a 3 de plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva.....	64
Cuadro 2.5.	Concentración de vitamina C en frutos de tres racimos de plantas de tomate plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva..	91

LISTA DE FIGURAS

Página

MARCO TEÓRICO

- Figura 1.** Progresión de la línea límite superior común y abstracta para macro y micronutrientes y elementos benéficos en relación con el estrés abiótico, y la progresión predicha de las líneas límite superiores para elementos de tierras raras ([Haneklaus et al., 2018](#))..... 5
- Figura 2.** Relaciones dosis-respuesta. I) Modelo lineal. II) Modelo de umbral (lineal). III) Modelo en forma de J. IV) Modelo en forma de U invertida. La línea punteada muestra el nivel inicial de la respuesta que se mide. A es la dosis umbral, es decir, dosis a partir de la cual se observan los efectos ([Lushchak, 2014](#)). 7
- Figura 3.** Respuestas horméticas en plantas superiores indicando los conceptos de euestrés y diestrés ([Balasubramaniam, 2015](#)). 8

CAPÍTULO I

- Figura 1.1.** Incremento porcentual del peso de semilla de tomate cv. Vengador, después de 12 h de imbibición en soluciones con diferentes concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05)..... 26
- Figura 1.2.** Longitud de vástago obtenido de plántulas de tomate cv. Vengador, después de siete días en cámaras de germinación en soluciones con diferentes concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05)..... 29

Figura 1.3.	Longitud de radícula de plántulas tomate cv. Vengador, tratadas con diferentes concentraciones de Ce durante la fase de imbibición. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).....	31
Figura 1.4.	Crecimiento relativo de vástago obtenido de plántulas tomate cv. Vengador después de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).....	32.
Figura 1.5.	Índice de germinación en obtenido de plántulas tomate cv. Vengador, evaluado en un periodo de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).....	34
Figura 1.6.	Biomasa seca de vástago obtenida de plántulas de tomate cv. Vengador, después de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).....	35
Figura 1.7.	Biomasa seca de total de plántulas de tomate cv. Vengador, después de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).....	36

Figura 1.8.	Relación biomasa seca de vástago y radícula de plántulas de tomate cv. Vengador, después de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).....	37
--------------------	---	----

CAPÍTULO II

Figura 2.1.	Curva de calibración empleada para determinar la concentración de vitamina C en frutos de tomate.....	51
Figura 2.2.	Número de flores por racimo en plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).....	55
Figura 2.3.	Porcentaje de amarre de fruto por racimo en plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).....	58
Figura 2.4.	Número de frutos por racimo en plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).....	60
Figura 2.5.	Peso promedio de un fruto en plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).....	61

Figura 2.6.	Rendimiento expresado en g por racimo en plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).....	63
Figura 2.7.	Diámetros polar y ecuatorial de frutos de tres racimos de tomate provenientes de plantas tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo y figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).....	65
Figura 2.8.	Luminosidad en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha (0 d) y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).....	68
Figura 2.9.	Ángulo de tono en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha (0 d) y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).....	70
Figura 2.10.	Índice de saturación de color (Croma) en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha (0 d) y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).....	72

- Figura 2.11.** Concentración de licopeno en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha (0 d) y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$)..... 75
- Figura 2.12.** Conductividad eléctrica en jugo de frutos de tres racimos de tomate en la cosecha (0 d) y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$)..... 77
- Figura 2.13.** Valor de pH en el jugo de frutos de tres racimos de tomate en la cosecha (0 d) y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$)..... 79
- Figura 2.14.** Porcentaje de pérdidas de peso obtenidas en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha (0 d) y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$)..... 80
- Figura 2.15.** Firmeza expresada en Newton (N) obtenida en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha (0 d) y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras

	distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).....	83
Figura 2.16.	Acidez titulable expresada en porcentaje de ácido cítrico obtenidos en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha (0 d) y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).....	87
Figura 2.17.	Sólidos Solubles totales expresados en grados Brix obtenidos en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha (0 d) y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).....	89

INTRODUCCIÓN

El cambio climático refiere a una variación estadísticamente significativa en ya sea el estado medio del clima o en su variabilidad, persistente durante un período prolongado (típicamente décadas o más). Puede ser debido a procesos internos naturales o a forzamiento externo, o a cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo ([VijayaVenkataRaman et al., 2012](#)).

El cambio climático está agravando los desafíos que enfrenta el sector agrícola, afectando negativamente a los sistemas agrícolas y ganaderos en la mayoría de las regiones del mundo. De manera paradójica, la agricultura contribuye en forma importante a la emisión de gases de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés greenhouse gas) que causan el cambio climático ([OECD, 2015](#)).

De acuerdo con [Gornall et al. \(2010\)](#), los impactos directos del cambio climático en la agricultura son: cambios en el clima promedio, variabilidad climática y fenómenos meteorológicos extremos (temperaturas extremas, sequía, fuertes lluvias e inundaciones, tormentas tropicales, entre otros); asimismo, dentro de los impactos indirectos en la productividad agrícola se cuentan: plagas y enfermedades, cambios en la disponibilidad de agua debido a cambios climáticos remotos y el aumento en el nivel medio del mar. Mientras que otros efectos no climáticos relacionados con las emisiones de GHG cambian la composición de la atmósfera, destacando el incremento en las concentraciones de CO₂ y de ozono.

En los últimos años han emergido como bioestimulantes novedosos los elementos benéficos; elementos que no son esenciales para plantas superiores pero que pueden desencadenar respuestas hormónicas; lo que conduce a afirmar que cuando son suministrados de manera correcta (dosis, fuente, modo de suministro, etc.), pueden tener gran potencial para enfrentar algunos de los desafíos que se presentan en la producción agrícola ante el cambio climático global ([Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2018](#)).

Dentro del grupo de los elementos benéficos se encuentra el cerio (Ce), elemento más abundante dentro del grupo de los elementos de las tierras raras, que ha mostrado gran potencial para ser empleado en agricultura como bioestimulante. En

este contexto, la investigación planteó evaluar los efectos que este elemento tiene en fase de germinación, en crecimiento y en parámetros de calidad de fruto en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). En este apartado de marco teórico, se establecen algunas definiciones de conceptos claves relacionados con la temática de esta tesis.

1. BIOESTIMULANTES VEGETALES

Los bioestimulantes son definidos como agentes que a bajas concentraciones mejoran los procesos bioquímicos básicos en plantas y suelos, en consecuencia, aumentan el crecimiento y el desarrollo de las plantas e incrementan su resistencia al estrés (Basak, 2008). Es decir, los bioestimulantes son aquellos materiales que no son nutrimentos o pesticidas que, aplicados a las plantas, semillas o sustratos de crecimiento en formulaciones específicas, pueden mejorar su salud, crecimiento y protección (Du Jardin, 2012). Un requisito indispensable para cubrir por un bioestimulante es que su aplicación no represente un riesgo para el ser humano, animales o para el medioambiente (Smoleń, 2012).

Los bioestimulantes ofrecen un enfoque potencialmente novedoso para la regulación y/o modificación de los procesos fisiológicos en las plantas para estimular el crecimiento, mitigar las limitaciones inducidas por el estrés y aumentar el rendimiento. Se están integrando cada vez más en los sistemas de producción con el objetivo de modificar los procesos fisiológicos en las plantas para optimizar la productividad. Los bioestimulantes de plantas basados en materiales naturales han recibido considerable atención tanto de la comunidad científica como de las empresas comerciales, especialmente en las últimas dos décadas (Yakhin *et al.*, 2017).

De acuerdo con Du Jardin (2015), los bioestimulantes pueden clasificarse en las siguientes categorías principales: Ácidos húmicos y fúlvicos, hidrolizados de proteínas y otros compuestos conteniendo nitrógeno, extractos de algas y productos botánicos, quitosano y otros biopolímeros, compuestos inorgánicos, hongos y bacterias benéficos. Esta clasificación permite evidenciar la naturaleza diversa de

los bioestimulantes vegetales y por tanto sus funciones fisiológicas también son diversas. [Du Jardin \(2015\)](#) incluye dentro del grupo de compuestos inorgánicos a los elementos benéficos y a las sales inorgánicas.

Los elementos benéficos (no esenciales para la nutrición de la planta), que tienen la capacidad de modificar los procesos fisiológicos de manera que proporcionen beneficios para el crecimiento, el desarrollo y/o las respuestas al estrés, constituyen una categoría distinta de bioestimulantes ([Halpern et al., 2015](#)).

2. ELEMENTOS BENÉFICOS

En la tabla periódica existen 118 elementos; los primeros 98 existen de manera natural, aunque algunos son encontrados solo en cantidades traza y fueron inicialmente descubiertos mediante síntesis en laboratorios. Los elementos con número atómico del 99 a 118 solo se han sintetizado en laboratorio ([De la Guardia y Garrigues, 2015](#)).

En tejidos vegetales se han encontrado más de 70 elementos; sin embargo, solo 17 de ellos son considerados esenciales para plantas superiores al cumplir los criterios de esencialidad propuestos en 1939 por Arnon y Stout ([Alcántar-González et al., 2016](#)). Los elementos esenciales para las plantas se clasifican en macro y micronutrientes. Los macronutrientes incluyen carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg), nitrógeno (N), azufre (S) y fósforo (P), de los cuales C, H y O representan aproximadamente el 95% de la materia seca de la planta y el resto de los macronutrientes están presentes en el tejido vegetal con concentraciones superiores a 1000 mg kg⁻¹ de seco peso. Los micronutrientes incluyen cloro (Cl), boro (B), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni) y zinc (Zn) y representan menos de 100 mg kg⁻¹ de peso seco ([Pilon-Smits et al., 2009](#)).

Otro grupo de elementos importante para plantas superiores son los denominados benéficos, elementos útiles dado que promueven el crecimiento e incrementan la resistencia a factores de estrés biótico y abiótico. Dentro de este grupo de elementos benéficos se encuentra el cerio ([Trejo-Téllez et al., 2016](#)).

Los elementos benéficos tienen la característica de presentar efectos horméticos (se abordarán en el siguiente apartado del marco teórico), este grupo de elementos se perfilan como moduladores del metabolismo primario y secundario, sus efectos se han evidenciado a nivel fisiológico, bioquímico y molecular. En plantas superiores se ha mostrado que pueden detonar respuestas positivas en indicadores de crecimiento, desarrollo, vida de florero, rendimiento, calidad de las cosechas, así como estimular respuestas adaptativas ante fenómenos adversos como las sequías, la salinidad de los suelos, o el ataque de plagas y enfermedades. Para obtener estas respuestas beneficiosas, las cantidades a aplicar deben ser en concentraciones muy bajas, a nivel micro o milimolar en soluciones aplicadas de forma foliar o a la raíz en sistemas hidropónicos; así también en las soluciones de florero en especies ornamentales (Gómez-Merino *et al.*, 2015). Los cinco elementos benéficos más investigados como bioestimulantes son Al, Co, Na, Se y Si; sin embargo, existen muchos otros elementos que también entran dentro de este grupo. Estos elementos promueven el crecimiento de varios taxones en ciertas condiciones ambientales, sin embargo, la función y la concentración varían para cada elemento y especie de planta. Se han obtenido algunos indicios sobre los mecanismos que subyacen a los efectos que promueven el crecimiento de los elementos beneficiosos utilizando diversos enfoques (Du Jardín, 2015).

En la **Figura 1** publicada por Haneklaus *et al.* (2018) se aprecian las respuestas que se registran en plantas tanto a la concentración de elementos esenciales como para la concentración de elementos benéficos. El estatus nutrimental (elementos esenciales) sigue funciones típicas de crecimiento, con zonas que van desde la deficiencia severa, pasado por deficiencias moderadas y suministro óptimo, hasta llegar a una zona de toxicidad. Es importante destacar que las pendientes de las funciones de crecimiento para macro y micronutrientes aumentan de manera considerable con la disminución de las concentraciones elementales críticas en el tejido vegetal. En la **Figura 1** también se observan las respuestas que muestran los elementos esenciales cuando existe un factor de estrés en presencia de elementos benéficos; el factor de estrés reduce el rendimiento, sin embargo, un elemento benéfico tiene el potencial para compensar esta brecha lo que resulta en que la

progresión de la línea límite de un nutriente no cambiará bajo estrés. El efecto compensatorio del estrés también se ha documentado en elementos de las tierras raras; sin embargo, los datos sugieren que estos elementos tienen probablemente un efecto hormético [Haneklaus et al. \(2018\)](#).

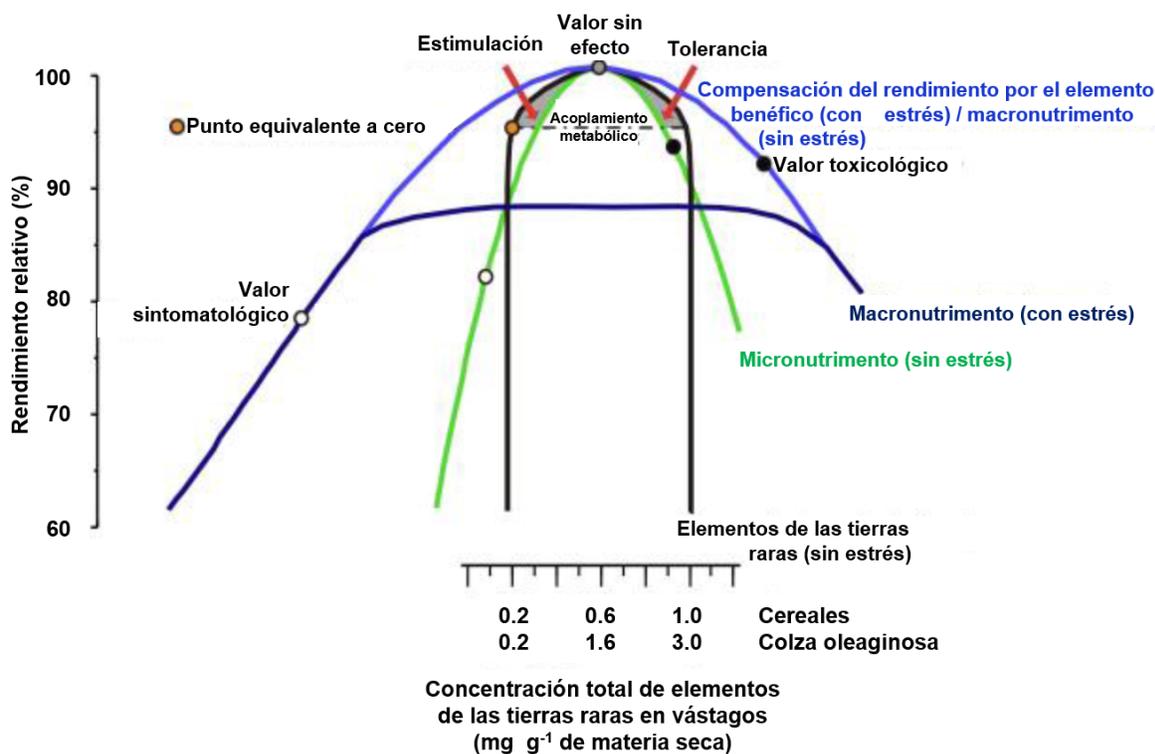


Figura 1. Progresión de la línea límite superior común y abstracta para macro y micronutrientes y elementos benéficos en relación con el estrés abiótico, y la progresión predicha de las líneas límite superiores para elementos de tierras raras ([Haneklaus et al., 2018](#)).

En el contexto anterior, los elementos benéficos están emergiendo como bioestimulantes novedosos que pueden incrementar la productividad de los cultivos y la calidad nutricional, mejorando las respuestas a estímulos ambientales u estresores en algunas especies de plantas ([Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2018](#)).

3. HORMESIS

El término hormesis fue empleado por primera vez en 1943 para describir los efectos de extractos del árbol de cedro rojo en el crecimiento de numerosas especies de hongos que tienen la capacidad de podrir la madera (Calabrese *et al.*, 2015). La hormesis originalmente se describió como un fenómeno de dosis-respuesta caracterizado por una estimulación a dosis baja y una inhibición a dosis alta. Es decir, es una relación dosis-tiempo-respuesta en la cual hay una dosis inicial dependiente de una respuesta tóxica, seguida por una respuesta compensadora o de rebote (Calabrese *et al.*, 2012). Así mismo, la dosis hormética a la cual responde una célula u organismo podrá variar dependiendo del individuo y sus características (Kouda e Iki, 2010).

De acuerdo con Lushchak (2014), dos modelos de relaciones dosis-respuesta son usados de manera frecuente; el modelo lineal (Figura 2.I) y el modelo de umbral (Figura 2.II). En el modelo lineal (Figura 2.I) el punto final muestra dependencia lineal de la dosis del efector; esto es también conocido como modelo lineal sin umbral. El ángulo α puede variar ampliamente y depende de muchos factores incluyendo el tipo de modelo, condiciones específicas usadas y las propiedades de los efectores. Está basado en efectos acumulativos de los actos individuales de la interacción entre el efector y el sujeto biológico. En muchos casos la respuesta no puede ser linealmente extrapolada a la dosis “cero”; entonces, los efectos solo pueden ser observados a partir de cierta dosis (umbral) ($X = A$) con diferentes distancias desde el inicio de la abscisa ($X = 0$). Esta relación se llama modelo umbral (Figura 2.II).

Por otro lado, existen relaciones donde bajas dosis de un efector, desencadenan respuestas opuestas a dosis altas que son llamadas respuestas horméticas; dentro de éstas se han descrito dos tipos principales. La Figura 2.III muestra la respuesta hormética en forma de J y la Figura 2.IV muestra la forma de U invertida, que bien podría ser llamada de manera más correcta forma de J invertida dado que es asimétrica y se corta en el punto “cero” de la abscisa (Lushchak, 2014).

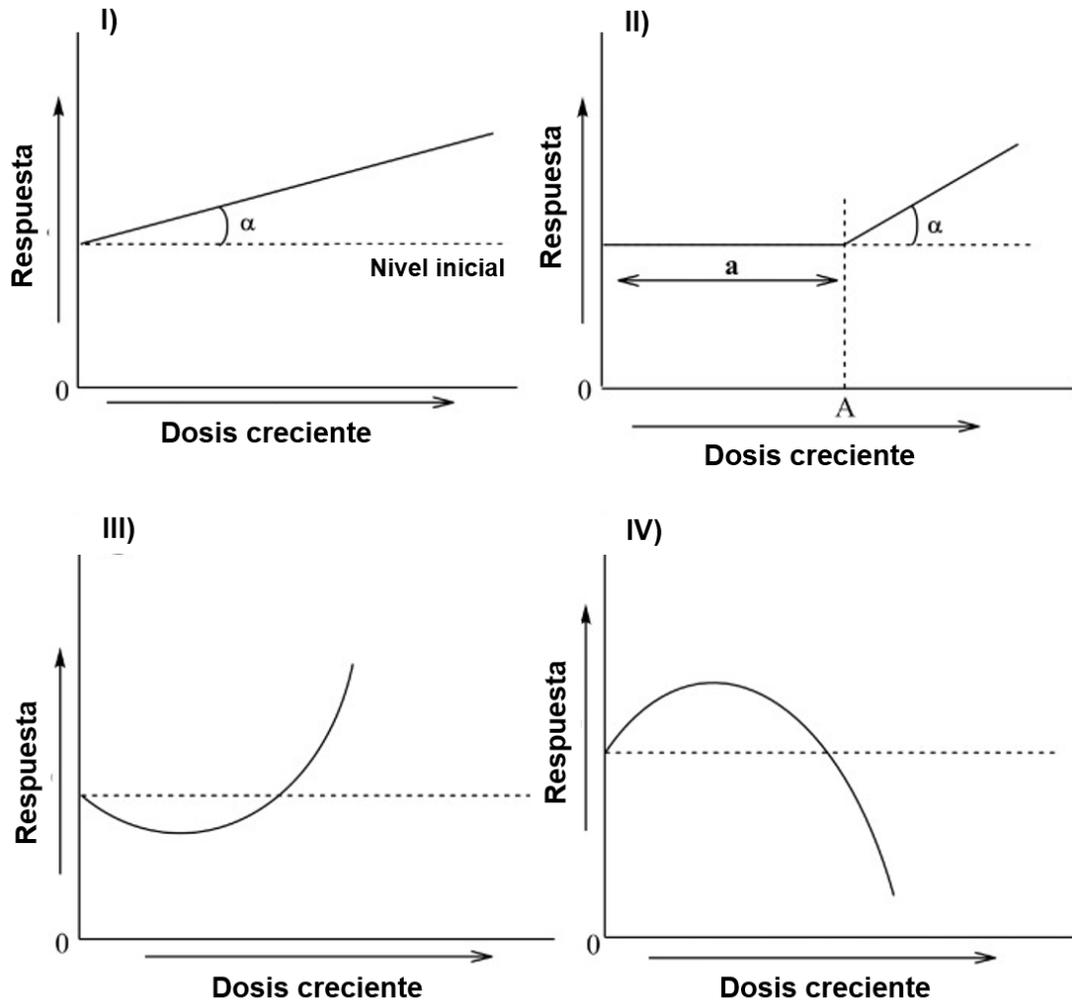


Figura 2. Relaciones dosis-respuesta. I) Modelo lineal. II) Modelo de umbral (lineal). III) Modelo en forma de J. IV) Modelo en forma de U invertida. La línea punteada muestra el nivel inicial de la respuesta que se mide. A es la dosis umbral, es decir, dosis a partir de la cual se observan los efectos (Lushchak, 2014).

Los factores responsables de la inducción de la hormesis se conocen como hormetinas o factores de estrés. En las plantas superiores, el desafío con diferentes niveles de estrés constituye un proceso de adaptación, teniendo reminiscencia con el fenómeno de hormesis (Hideg *et al.*, 2013). En este sentido el estrés puede ser definido como positivo o verdadero (eustrés), que es una condición de estrés que no causa daño permanente, sino un marco de respuestas fisiológicas moduladas por modificaciones transcripcionales y postranscripcionales que permiten la

aclimatación al estrés. Por el otro lado se tiene el estrés negativo (diestrés), que es la condición que ocasiona efectos perjudiciales a nivel metabólico, que en escenarios extremos causa la muerte celular o la muerte del organismo (Van Hoeck *et al.*, 2017). En la **Figura 3**, tomada de Balasubramaniyam (2015) se incluyen los conceptos de euestrés y diestrés.

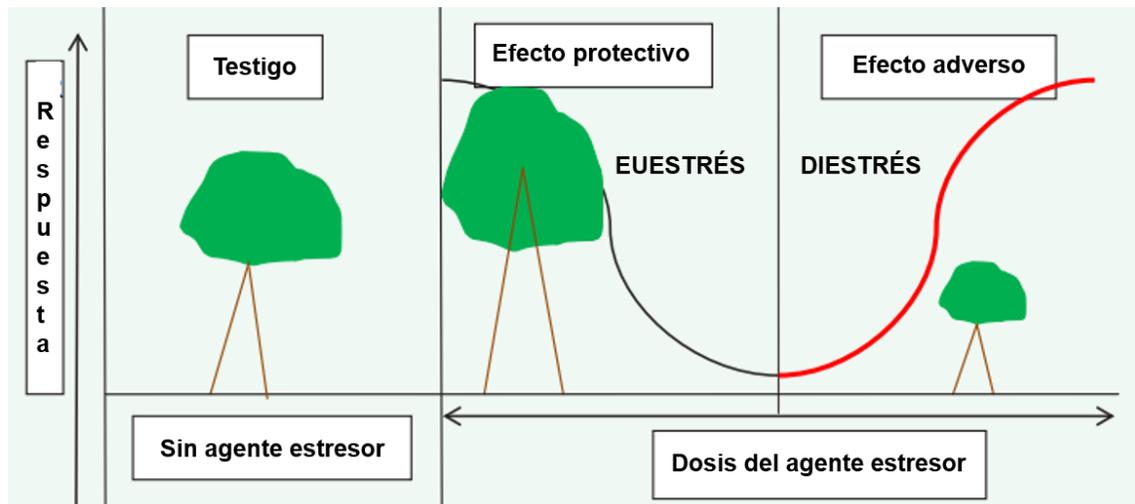


Figura 3. Respuestas horméticas en plantas superiores indicando los conceptos de euestrés y diestrés (Balasubramaniyam, 2015).

En plantas superiores todavía no se conocen con exactitud todos los mecanismos y vías de transducción de señales por los cuales la respuesta hormética se lleva a cabo; así, la evidencia experimental sugiere que no existe un mecanismo único sino varias vías que son capaces de desencadenar la hormesis (Zhang *et al.*, 2008).

López-Moreno *et al.* (2010) reportaron efectos horméticos del Ce suministrado a partir de nanopartículas de óxido de Ce ($\text{CeO}_2\text{-NP}$) en las dosis comprendidas entre 500 y 1000 mg L^{-1} ; observándose que el Ce aumentó de manera significativa la biomasa de alfalfa. Por el contrario, la dosis de 4000 $\text{mg CeO}_2\text{-NP L}^{-1}$ redujo el crecimiento.

4. ELEMENTOS DE LAS TIERRAS RARAS

Los elementos de tierras raras (REE, por sus siglas en inglés, rare earth elements), son un grupo de metales que incluye al itrio, catorce elementos de la serie de los lantánidos [números atómicos de 57 a 71, empezando con el lantano (La) hasta el lutecio (Lu)] y el escandio (Haque *et al.*, 2014). Los REE ocurren juntos en depósitos minerales con diferentes concentraciones de distribución; posteriormente se separan entre sí en compuestos individuales de REE; es decir, óxidos, cloruros y fluoruros (Du y Graedel, 2011).

La mayoría de los REE no son tan raros como lo sugiere el nombre del grupo. Fueron nombrados "elementos de tierras raras" porque fueron identificados durante los siglos XVIII y XIX como "tierras" (originalmente definidas como materiales que no pueden ser modificados por el calor) y en comparación con otras "tierras", como la cal o la magnesia, éstos eran relativamente raros (Van Gosen *et al.*, 2014).

El cerio (Ce) es un miembro de la serie de los lantánidos de los metales en la tabla periódica. El descubrimiento de Ce en una forma de óxido se informó por primera vez en 1803 por científicos en Suecia y Alemania (Weeks, 1932). El cerio fue nombrado como el asteroide Ceres descubierto en el año 1801, dos años antes que el elemento (Tyler, 2004). Este elemento es un metal brillante blanco plateado, blando, maleable, dúctil y considerado un gran conductor de electricidad (Ramos *et al.*, 2016). Tiene el número atómico de 58, se funde a 799 °C y se vaporiza a 3434 °C, es considerado el elemento más reactivo de las tierras raras a excepción del europio, por lo que al contacto con el oxígeno se oxida y se torna pardo rojizo (Hammond, 2004).

Las aplicaciones del Ce son diversas. Se ha reportado su uso en medicamentos y productos farmacéuticos, como material de partida para síntesis orgánica, en aleaciones principalmente con lantano con propósitos metalúrgicos, en contadores de centelleo, entre otras aplicaciones (Dahle y Arai, 2015).

El cerio es el más abundante de los metales de tierras raras que se encuentran en la corteza terrestre, el cual comprende aproximadamente 0.0046% en peso. El cerio y otros metales de los lantánidos existen naturalmente en una serie de minerales en el ambiente incluyendo carbonatos, silicatos, fosfatos y óxidos (Hedrick, 2004). El

Ce se encuentra en minerales como monacita, allanita, cerita, bastnasita y samarskita (Patnaik, 2003), siendo las principales fuentes de este elemento la monacita y bastnasita, en las que coexiste con otros elementos de tierras raras, como el torio y el lantano (Kokare *et al.*, 2010). Los principales depósitos de monacita se encuentran en India y Brasil, y los principales depósitos de bastnasita en Estados Unidos de América (Hammond, 2004).

En ambientes geoquímicos de baja temperatura, el cerio comúnmente existe tanto en el estado ceroso trivalente (Ce^{3+}) como en el estado cérico tetravalente (Ce^{4+}). El cerio exhibe una estabilidad única en el estado tetravalente; otros lantánidos son sólo estables en el estado trivalente. Esta característica permite una fácil separación del cerio de otros elementos de tierras raras a través de la oxidación (formando CeO_2) seguida de una filtración de solubilidad variable (Dahle y Arai, 2015).

5. CERIO EN LA AGRICULTURA

En China desde la década de los 70 se inició la venta de los denominados microfertilizantes comerciales de las tierras raras, en los cuales los principales constituyentes fueron lantano y cerio en forma de cloruros y nitratos. Estos productos eran aplicados a los cultivos vía aspersiones foliares, empleados en el tratamiento de semillas o adicionados a la raíz en forma sólida o líquida (Hu *et al.*, 2004).

Con respecto al empleo del Ce en la producción de cultivos, investigaciones anteriores han sugerido que los efectos de este metal a bajas concentraciones son positivos y sólo exhiben efectos fitotóxicos a concentraciones muy altas. En este contexto, también es importante destacar que al considerar los efectos de factores tales como el pH del suelo, los quelatos del suelo y el nivel disponible de fertilizantes existen resultados contradictorios acerca de los efectos de los REEs en el crecimiento y desarrollo de las plantas. He y Loh (2000) informaron que el Ce suministrado como nitrato de cerio en dosis oscilando entre 0.5 y 10 $\mu\text{mol L}^{-1}$ en un medio de cultivo, aumentó significativamente el crecimiento de raíces primarias de *Arabidopsis thaliana*. Asimismo, el cerio (Ce) mejora el crecimiento del cilantro y la

nutrición de plantas de espinaca y tomate. En frijol y maíz, este elemento incrementa la absorción de Fe (Gómez-Merino *et al.*, 2015).

He y Loh (2000) mostraron que la aplicación de 0.5 μM $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ a plantas de *Arabidopsis thaliana*, aumentó la altura de planta en 60.8% y la adición de 10 μM $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ incrementó en 39.2% la longitud de raíz. En plántulas de espinaca (*Spinacia oleracea*) el tratamiento con $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ a dosis de 10 $\mu\text{g mL}^{-1}$ incrementó el peso de biomasa fresca y seca en 28.6 y 37.1%, respectivamente; asimismo el Ce aumentó la concentración de clorofila, esto debido a la mejora de las actividades enzimáticas en la síntesis de clorofila y la tasa fotosintética, además de tener un efecto protector para las células a las especies reactivas de oxígeno (Fashui *et al.*, 2002). En maíz, la adición de 20 μM CeCl_3 incrementó en 29.6% el peso fresco de planta (Gong *et al.*, 2011); asimismo, en plántulas de lechuga, la aplicación de $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$ en dosis entre 5 y 25 mg L^{-1} incrementó el peso de la biomasa seca (Barbieri *et al.*, 2013). En pak choi, la aspersion foliar de $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ a dosis de 50, 150 y 300 mg L^{-1} ocasionó el incremento en la concentración de azúcares solubles en hojas (Hu *et al.*, 2015). Efectos positivos del Ce también se han reportado en jengibre (*Dioscorea zingiberensis*), donde la aplicación de $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ en concentraciones de 3.1 a 46 μM Ce promovió el crecimiento de la raíz; en tanto que, la aplicación de dosis en el rango de 25 a 50 μM Ce incrementó el volumen de raíz (Zhang *et al.*, 2000). De igual manera se han realizado estudios sobre la aplicación Ce en forma de nanopartículas de dióxido de cerio (nCeO_2). En arroz, la aplicación de 500 $\text{mg nCeO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ al suelo, disminuyó el contenido de almidón en grano en dos de tres variedades evaluadas; mientras que la concentración K y Ca en granos incrementó y la concentración de S y Fe disminuyó (Rico *et al.*, 2013). En este mismo sentido, varios estudios hidropónicos han intentado investigar la acumulación y translocación de las nanopartículas de nCeO_2 en las plantas. La mayoría de estos estudios demostraron un aumento en la acumulación dependiente de la dosis de Ce en las raíces de varias especies de plantas (tomate, pepino, calabaza y soya) y una translocación limitada de Ce hacia el tallo (Dan *et al.*, 2016).

6. PRODUCCIÓN MUNDIAL Y NACIONAL DE TOMATE

El tomate o jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta perenne en forma de arbusto que se cultiva anualmente y puede desarrollarse de forma rastrera, semi-erecta o erecta. Es uno de los frutos que contiene mayor cantidad de vitaminas y minerales, tiene bajo valor calórico y se caracteriza por un elevado contenido de agua, de 90 a 94%. Además, se reportan importantes contenidos de azúcares como fructosa, glucosa y sacarosa ([Jaramillo et al., 2007](#)).

Los tomates son una buena fuente de moléculas bioactivas, especialmente carotenoides, de los cuales destaca el licopeno, lo que les confiere no sólo un alto valor nutrimental, sino también propiedades benéficas para la salud por su gran actividad antioxidante, aportando un importante valor añadido desde el punto de vista del consumidor ([Colle et al., 2010](#)). Por otra parte, el tomate es la hortaliza de mayor valor económico en el mundo. Su demanda aumenta continuamente y con ella su cultivo, producción y comercio ([Cuesta y Mondaca, 2014](#)).

A nivel mundial, los rendimientos de tomate muestran un amplio rango. De acuerdo con las estadísticas de 2016 de la FAO, los cinco países que tienen los máximos rendimientos son Holanda, Bélgica, Reino Unido, Finlandia y Suecia con valores medios en t ha⁻¹ de 507.04, 506.90, 416.19, 365.96 y 365.5, respectivamente. En nuestro país el rendimiento promedio en 2016 fue de 43.34 t ha⁻¹. Por otro lado, China, India, Nigeria, Egipto y Turquía son los países que presentan mayor área cosechada de tomate, con superficies en ha de 1,003,992, 760,000, 574,441, 199,712 y 188,270; para México el área cosechada de tomate es de 93376 ha, lo que lo sitúa en el lugar 10 a nivel mundial ([FAOSTAT Database, 2016](#)).

El volumen de producción de tomate en México en el año 2016 fue de aproximadamente 4.05 millones de toneladas lo que lo ubica también en el lugar 10 mundial; mientras que en este mismo año, el rendimiento fue de alrededor de 56.42, 18.4, 13.04, 12.6 y 7.94 t en China, India, Estados Unidos de América y Turquía, respectivamente ([FAOSTAT Database, 2016](#)).

En México, es el cultivo hortícola de mayor importancia económica y social, por la superficie sembrada, el volumen en el mercado nacional, y las divisas generadas. Su popularidad se debe al aceptable sabor y disponibilidad del fruto en una amplia

gama de ambientes, así como a su relativa facilidad para ser cultivado y la versatilidad de su uso (Cruz, 2007).

En el año agrícola 2017 (al 30 de septiembre de 2017), en México se sembraron 48174 ha de tomate, de las cuales se cosecharon 34067 ha, y se obtuvo una producción de poco más de 2.1 millones de toneladas con un rendimiento promedio por hectárea fue de 61.65 t (SIAP, 2017a). En este ciclo, Sinaloa encabeza la superficie sembrada con 12,981 ha, seguido de Michoacán (5,841 ha), Zacatecas (3,029 ha), San Luis Potosí (2,925 ha) y Jalisco (2,400 ha). Los estados con mayor rendimiento obtenido en este periodo son Querétaro (371.392 t ha⁻¹), Oaxaca (130.157 t ha⁻¹), Morelos (126.075 t ha⁻¹) y Puebla (108.378 t ha⁻¹). En cuanto al volumen de producción, los estados líderes son Sinaloa (744,824 t), San Luis Potosí (201,055 t), Sonora (109,579 t), Baja California Sur (80,068 t) y Querétaro (77,658 t) (SIAP, 2017b).

7. LITERATURA CITADA

- Alcántar-González G, Trejo-Téllez LI, Fernández-Pavía YL, Rodríguez-Mendoza MN. 2016. *In: Nutrición de Cultivos. Segunda Edición.* Alcántar-González G, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC (eds.). Biblioteca Básica de Agricultura. Colegio de Postgraduados. Guadalajara, Jalisco, México. pp. 23-55.
- Balasubramaniyam A. 2015. Hormetic dose response as the paradigm of plant response to stress. *International Journal of Plant Biology and Research* 3(2): 1037.
- Barbieri APP, Espíndola MCG, de Menezes NL, Henrique DFS. 2013. Tratamento de sementes de alface com soluções aquosas de cério e lantânio. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 43(1): 104-109.
- Basak A. 2008. Biostimulators – definitions, classification and legislation. *In: Monographs Series: Biostimulators in Modern Agriculture. General Aspects.* Gawrońska H. (ed.). Wieś Jutra. Warsaw, Poland. pp. 7-17.

- Calebrese EJ, Dhawan G, Kapoor R, Iavicoli I, Calebrese V. 2015. HORMESIS: A Fundamental Concept with Widespread Biological and Biomedical Applications. *Gerontology* DOI: 10.1159/000441520
- Calabrese V, Cornelius C, Dinkova-Kostova AT, Iavicoli I, Di Paola R, Koverech A, Cuzzocrea S, Rizzarelli E, Calebrese EJ. 2012. Cellular stress responses, hormetic phytochemicals and vitagenes in aging and longevity. *Biochimica et Biophysica Acta* 1822(5): 753-783. DOI: 10.1016/j.bbadis.2011.11.002
- Colle I, Lemmens L, Tolesa G, Van-Buggenhout S, De-Vleeschouwer K, Van-Loey, A Hendrickx M. 2010. Lycopene degradation and isomerization kinetics during thermal processing of an olive oil/tomato emulsion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58(24): 12784-12789. DOI: 10.1021/jf102934u
- Cruz LB. 2007. Calidad de semilla de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) por efecto de potenciales osmóticos, calcio y podas bajo condiciones de invernadero. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 177 p.
- Cuesta G, Mondaca E. 2014. Efecto de un biorregulador a base de auxinas sobre el crecimiento de plantines de tomate. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 20(2): 215-222. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2014.01.001>
- Dahle JT, Arai Y. 2015. Environmental geochemistry of cerium: Applications and toxicology of cerium oxide nanoparticles. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12(2): 1253-1278. DOI: 10.3390/ijerph120201253
- Dan Y, Ma X, Ma X, Zhang W, Liu K, Stephan C, Shi H. 2016. Single particle ICP-MS method development for the determination of plant uptake and accumulation of CeO₂ nanoparticles. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 408 (19): 5157-5167. <https://doi.org/10.1007/s00216-016-9565-1>
- De la Guardia M, Garrigues S. 2015. Handbook of mineral elements in food. John Wiley & Sons, Ltd. West Sussex, UK. 747 p.

- Du Jardin P. 2012. The Science of Plant Biostimulants - A Bibliographic Analysis. European Commission. Disponible en línea en: https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/169257/1/Plant_Biostimulants_final_report_bio_2012_en.pdf. Consultado: Octubre 15, 2018.
- Du Jardin P. 2015. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae* 196: 3–14. doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.021
- Du X, Graedel TE. 2011. Uncovering the global life cycles of the rare earth elements. *Scientific Reports* 1: 145. DOI: 10.1038/srep00145
- FAOSTAT Database. 2016a. Rendimiento, Área cosechada, Producción-Cantidad. Tomates, frescos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en línea en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>. Consultado: Octubre 18, 2018.
- Fashui H, Ling W, Xiangxuan M, Zheng W, Guiwen Z. 2002. The effect of cerium (III) on the chlorophyll formation in spinach. *Biological Trace Element Research* 89(3): 263-276. <https://doi.org/10.1385/BTER:89:3:263>
- Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI. 2018. The Role of Beneficial Elements in Triggering Adaptive Responses to Environmental Stressors and Improving Plant Performance. *In: Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants*. Vats S (ed.). Springer Nature Singapore. pp. 137-172. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9029-5_6
- Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI, Cuacua-Temiz C, Jácome-Chacón MA, Sentíes-Herrera H. 2015. Los elementos benéficos: potencial para innovar la producción agrícola. *Agroentorno* 166: 19-20.
- Gong X, Hong M, Wang Y, Zhou M, Cai J, Liu C. 2011. Cerium relieves the inhibition of photosynthesis of maize caused by manganese deficiency. *Biological Trace Element Research* 141(1-3): 305-316. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8716-z>
- Gornall J, Betts R, Burke E, Clark R, Camp J, Willett K, Wiltshire A. 2010. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-

- first century. *Philosophical Transactions of Royal Society B* 365: 2973-2989. DOI:10.1098/rstb.2010.0158
- Halpern M, Bar-Tal A, Ofek M, Minz D, Muller T, Yermiyahu U. 2015. The Use of Biostimulants for Enhancing Nutrient Uptake. *Advances in Agronomy* 130: 141–174. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.001>
- Hammond CR. 2004. Section 4. The Elements. *In: CRC Handbook of Chemistry and Physics* 85th. Lide DR (ed.). CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton, FL. pp. 4-1–4-36.
- Haneklaus SH, Bloem E, Schnug E. 2018. Hungry plants – A short treatise on how to feed crops under stress. *Agriculture* 8(3): 43. DOI: 10.3390/agriculture8030043
- Haque N, Hughes A, Lim S, Vernon C. 2014. Rare Earth Elements: Overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact. *Resources* 3: 613-635. DOI:10.3390/resources3040614
- He YW, Loh CS. 2000. Cerium and lanthanum promote floral initiation and reproductive growth of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science* 159: 117-124. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(00\)00338-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00338-1)
- Hedrick JB. 2004. Rare earths: U.S. Geological Survey Minerals Yearbook. Vol. I, pp. 60.1–60.16.
- Hideg E, Jansen MA, Strid A. 2013. UV-B exposure, ROS, and stress: inseparable companions or loosely linked associates? *Trends Plant Science* 18: 107-115. DOI: 10.1016/j.tplants.2012.09.003
- Hu YF, Yuan CM, Jiang SL, Ma KY, Peng JJ, Pu Q, Yuan S. 2015. Direct applications of cerium and yttrium on vegetable pak choi. *Fresenius Environmental Bulletin* 24(11c): 4173-4178.
- Hu Z, Herfried R, Gerd S, Schnug E. 2004. Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: A review. *Journal of Plant Nutrition* 27(1): 183-220. <https://doi.org/10.1081/PLN-120027555>

- Jaramillo J, Rodríguez V, Guzmán M, Zapata M, Rengifo T. 2007. Manual técnico de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) Bajo condiciones protegidas en la producción de tomate. Medellín, Colombia. 331 p.
- Kokare BN, Mandhare AM, Anuse MA. 2010. Liquid-Liquid Extraction of Cerium (IV) From Salicylate Media Using N-7v-Octylaniline In Xylene As An Extractant. *Journal of the Chilean Chemical Society* 55(4): 431-435. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072010000400004>
- Kouda K, Iki M. 2010. Beneficial effects of mild stress (hormetic effects): dietary restriction and health. *Journal of Physiological Anthropology* 29(4): 127-132. <https://doi.org/10.2114/jpa2.29.127>
- López-Moreno ML, De la Rosa G, Hernández-Viezcas JA, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL. 2010. XAS corroboration of the uptake and storage of CeO₂ nanoparticles and assessment of their differential toxicity in four edible plant species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58(6): 3689-3693. DOI: 10.1021/jf904472e.
- Lushchak VI. 2014. Dissection of the hormetic curve: Analysis of components and mechanisms. *Dose-Response* 12: 466-479. DOI: 10.2203/dose-response.13-051.Lushchak
- OECD. 2015. Agriculture and climate change. Organisation for Economic Co-operation and Development. Disponible en línea en: <https://www.oecd.org/tad/sustainable-agriculture/agriculture-climate-change-september-2015.pdf>. Consultado: Octubre 15, 2018.
- Patnaik P. 2003. Handbook of inorganic chemicals. McGraw-Hill. New York, USA. 529 p.
- Pilon-Smits EAH, Quinn CF, Tapken W, Malagoli M, Schiavon M. Physiological functions of beneficial elements. 2009. *Current Opinion in Plant Biology* 12: 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.009>
- Rico CM, Morales MI, Barrios AC, McCreary R, Hong J, Lee WY, Nunez J, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL. 2013. Effect of cerium oxide nanoparticles on the quality of rice (*Oryza sativa* L.) grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61(47): 11278-11285. doi: 10.1021/jf404046v.

- Ramos SJ, Dinali GS, Oliveira C, Martins GC, Moreira CG, Siqueira JO, Guilherme LRG. 2016. Rare Earth Elements in the Soil Environment. *Current Pollution Reports* 2(1): 28-50. <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0026-4>
- SIAP. 2017a. Avances de siembras y cosechas. Resumen nacional por cultivo. Tomate. Año agrícola 2017. Situación al 30 de septiembre de 2017. Disponible en http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalSinPrograma.do. Consultado: Octubre 18, 2018.
- SIAP. 2017b. Avances de siembras y cosechas. Tomate. Resumen nacional por estado. Año agrícola 2017. Situación al 30 de septiembre de 2017. Disponible en http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do. Consultado: Octubre 18, 2018.
- Smoleń S. 2012. Foliar nutrition: current state of knowledge and opportunities. *In: Advances in citrus nutrition*. Srivastava AK (ed.). Springer Science+Business Media BV. Dordrecht; Heidelberg; New York, London. pp. 41-58.
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Alcántar-González G. 2016. *In: Nutrición de Cultivos*. Segunda Edición. Alcántar-González G, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC (eds.). Biblioteca Básica de Agricultura. Colegio de Postgraduados. Guadalajara, Jalisco, México. pp. 59-101.
- Tyler G. 2004. Rare earth elements in soil and plant systems- A review. *Plant and Soil* 267(1-2): 191-206. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-4888-2>
- Van Gosen BS, Verplanck PL, Long KR, Gambogi J, Seal II RR. 2014. The Rare-Earth Elements- Vital to modern technologies and lifestyles. USGS Mineral Resources Program. Disponible en línea en: <https://pubs.usgs.gov/fs/2014/3078/pdf/fs2014-3078.pdf>. Consultado: Octubre 16, 2018.
- Van Hoeck A, Horemans N, Nauts R, Van Hess M, Vandenhove H, Blus R. 2017. Lemna minor plants chronically exposed to ionising radiation: RNA-seq análisis indicates a dose rate dependent shift from acclimation to survival

- strategies. Plant Science 257: 84-95.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.01.0107>
- VijayaVenkataRaman S, Iniyar S, Goic T. 2012. A review of climate change, mitigation and adaptation. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16: 878-897. DOI: 10.1016/j.rser.2011.09.009
- Weeks ME. 1932. The discovery of the elements. XVI. The rare earth elements. Journal of Chemical Education 9(10): 1751-1773. DOI: 10.1021/ed009p1751
- Yakhin OI, Lubyano AA, Yakhin IA, Brown PH. 2017. Biostimulants in plant science: a global perspective, Frontiers in Plant Science 7: Article2049. DOI: 10.3389/fpls.2016.02049.
- Zhang WF, Huang YB, Zhang MS, Liu ZG. 2000. Nonlinear optical absorption in undoped and cerium-doped BaTiO₃ thin films using Z-scan technique, Applied Physics Letters 76: 1003. DOI: 10.1063/1.125920
- Zhang Q, Pi J, Woods CG, Jarabek AM, Clewell HJ, Andersen ME. 2008. Hormesis and adaptive cellular control systems. Dose-Response 6(2): 196-208. DOI: 10.2203/dose-response.07-028.Zhang

CAPÍTULO I. CERIO EN LA GERMINACIÓN DE TOMATE

1.1. INTRODUCCIÓN

Los elementos pertenecientes al grupo de las tierras raras (REEs) están teniendo gran importancia principalmente debido a su utilidad en las tecnologías modernas, con muchas aplicaciones para los desarrollos de nueva tecnología (Gonzalez *et al.*, 2014; Du y Graedel, 2011). El grupo de los elementos tierras raras está integrado por 17 elementos con características fisicoquímicas similares (Ramos *et al.*, 2016). Sus usos más importantes son como componentes de imanes de alta resistencia en equipos electrónicos, turbinas eólicas y vehículos eléctricos, para armas guiadas de precisión, computadoras, equipos de audio y automóviles, entre otros. También se utilizan en cantidades bajas como catalizadores de craqueo de fluidos durante el refinado de petróleo, en la producción de vidrio óptico y como componentes en fósforos para iluminación de bajo consumo energético (Hayes-Labruto *et al.*, 2013). Sin embargo, este grupo de elementos tienen potencial para ser utilizados en el ámbito de la nutrición de cultivos, esto debido a que influyen de manera positiva el crecimiento y el rendimiento; asimismo, promueven la tolerancia a distintos factores de estrés tanto biótico como abiótico (Gómez-Merino *et al.*, 2015).

El Ce fue descubierto en 1803, por primera vez en forma de óxido (Weeks, 1932). Es el más abundante de los metales de las tierras raras que se encuentran en la corteza terrestre (Hedrick, 2004), donde comprende aproximadamente 0.0046% en peso. El Ce y otros metales del grupo de los lantánidos se encuentran naturalmente en una serie de minerales en el ambiente los cuales incluyen carbonatos, silicatos, fosfatos y óxidos (Anthony *et al.*, 2000).

Se han realizado diversos estudios acerca del efecto de los REEs en procesos de germinación con resultados diferenciales entre especies. En semillas de arroz el tratamiento con $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ a concentraciones de 2.5 a 20 $\mu\text{g mL}^{-1}$ incrementó de manera significativa la germinación (Fashui, 2002). Recientemente, también en arroz (cv. Morelos A-98) se reportó que el tratamiento de las semillas con $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ con dosis 4, 8, and 12 μM incrementó significativo la germinación y el crecimiento inicial, respecto al testigo sin Ce (Ramírez-Olvera *et al.*, 2018). Contrario

a los resultados anteriores, [Ma et al. \(2010\)](#) mostraron que el tratamiento con nanopartículas de CeO₂ (CeO₂-NP) a una concentración de 2000 mg L⁻¹ no afectaron la germinación y elongación de la raíz del tomate, canola, rábano, trigo, pepino y col; y solo en lechuga se observó reducción ligera de la elongación de la raíz.

En el contexto anterior, esta investigación evaluó los efectos que distintas dosis de Ce suministrado a partir de CeCl₃ 7H₂O tiene en parámetros relacionados con la germinación y el crecimiento inicial de tomate cv. Vengador.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de concentraciones de cerio adicionado a partir de CeCl₃.7H₂O, en la imbibición de semillas, en parámetros asociados a la germinación y al crecimiento inicial de tomate cv. Vengador.

1.3 HIPÓTESIS GENERAL

El suministro de CeCl₃.7H₂O en todas las concentraciones evaluadas, incrementa la absorción de agua en semillas de tomate cv. Vengador durante la fase de imbibición; mejora los parámetros asociados a la germinación y promueve el crecimiento inicial de plántulas de esta especie. Las respuestas positivas causadas por el Ce se relacionan de manera positiva con la dosis de éste.

1.4. MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1. Condiciones experimentales

El presente trabajo fue realizado en condiciones de laboratorio durante el periodo de verano 2017 en las instalaciones del Laboratorio de Nutrición Vegetal “Salvador Alcalde Blanco” ubicado en el edificio de Edafología e Hidrociencias perteneciente al Campus Montecillo del Colegio de Postgraduado. El Campus Montecillo se localiza en la región oriente del Estado de México, en el km 36.5 de la Carretera México-Texcoco km 36.5. Sus coordenadas geográficas son 19.52° LN, 98.88° LO y tiene una altitud aproximada de 2,250 m.

1.4.2. Material vegetal

Se utilizaron semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Vengador de la casa comercial Syngenta de la variedad denominada Roma o Saladette.

1.4.3. Diseño experimental

Se evaluaron los efectos de tres concentraciones de Ce en la germinación de semillas de tomate cv. Vengador en cajas Petri. Las concentraciones de Ce evaluadas fueron 5, 10 y 15 μM . El Ce fue suministrado a partir de $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ con una fuente grado reactivo Sigma-Aldrich® (**Cuadro 1.1**) y las soluciones fueron preparadas usando agua destilada ($\text{pH}=7.2$). El testigo consistió en utilizar agua destilada (0 μM Ce). El valor de pH de las soluciones con 5, 10 y 15 μM Ce fue de 6.94, 6.73 y 5.35, respectivamente.

Cuadro 1.1. Tratamientos de cerio a evaluar en la imbibición y germinación de semillas, y en el crecimiento inicial de plántulas de tomate cv. Vengador.

Concentración de Ce (μM)				Fuente
0	5	10	15	$\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con un total de cuatro repeticiones por tratamiento. Cada unidad experimental consistió en una caja Petri con papel filtro, un total de 15 semillas por repetición y la solución de $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ correspondiente a cada tratamiento.

1.4.4. Aplicación de tratamientos

Los tratamientos con Ce fueron aplicados en dos momentos; el primero, durante la fase de imbibición de las semillas (12 h); el segundo, durante la fase de evaluación de parámetros asociados a la germinación y al crecimiento inicial de tomate.

1.4.5. Variables evaluadas

1.4.5.1. Peso de semillas, inicial y posterior a la fase de imbibición

Se pesaron grupos de 15 semillas para cada tratamiento y sus repeticiones, para determinar el peso inicial de las semillas. Posterior a esto se colocaron las semillas previamente pesadas durante 12 h para la imbibición, en frascos y se añadió 10 mL de la solución correspondiente a la dosis de Ce. Transcurrido el tiempo de imbibición, las semillas se enjuagaron con H₂O destilada, para conocer la ganancia de peso de la semilla, se pesó nuevamente para determinar el peso final, para conocer el incremento porcentual del peso de semilla de tomate después de 12 h de imbibición, se tomó el peso inicial como 100% (Bewley y Black, 1982).

1.4.5.2. Índice de germinación (IG)

Se cuantificó cada 24 h, por un periodo de siete días después de la siembra (dds), el número de semillas germinadas por unidad experimental, considerando como semilla germinada todas aquellas que presentaron radícula o protrusión de ésta con un tamaño ≥ 2 mm. Los índices de germinación (IG) se estimaron con la siguiente fórmula descrita por Islam *et al.* (2012):

$$IG = \frac{Germ_{Ce} - Germ_T}{Germ_T}$$

Donde $Germ_{Ce}$ es el porcentaje promedio de semillas germinadas con alguna de las concentraciones de Ce evaluada y $Germ_T$ es el porcentaje de semillas germinadas en el testigo.

1.4.5.3. Porcentaje relativo de germinación (PRG)

El porcentaje relativo total de germinación se estimó para todos los tratamientos durante el experimento. Para lo anterior se utilizó la fórmula siguiente descrita por Tam y Tiquia (1994):

$$PRG = \frac{NSG_{Ce}}{NSG_T} \times 100$$

Donde NSG_{Ce} es el número de semillas germinadas según la concentración de Ce administrada, NSG_T es el número de semillas germinadas en el testigo.

1.4.5.4. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG)

El coeficiente de velocidad de germinación (CVG) representa una medida más sensible de la germinación de la semilla con respecto al porcentaje de germinación, ya que da más peso a las semillas germinantes anteriores y puede determinar si hay retrasos significativos en la germinación, incluso cuando todas las semillas germinan (González-Zertuche y Orozco-Segovia, 1996). El CVG se basa en el número de plántulas que germinan en cada unidad experimental por día hasta el final del experimento. La fórmula utilizada para la determinación del CVG fue la siguiente (Gardner *et al.*, 2003):

$$\frac{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas}}{\sum(N_1/1 + N_2/2 + N_3/3 \dots + N_7/7)}$$

Donde N_1 es el número de nuevas semillas que germinan en el día 1, N_2 es igual al número de nuevas semillas que germinan el día 2, hasta el N_7 donde se contabilizan el número de nuevas semillas que germinan al día 7. El coeficiente de velocidad de germinación se determinó individualmente para cada unidad tratamiento, obteniendo así el valor para cada dosis de $CeCl_3$ respectivamente.

1.4.5.5. Longitud de vástago y radícula

Para la determinación de las longitudes de vástago y radícula después de siete días de iniciado el experimento, se tomaron fotografías de cinco plántulas que incluyeron una escala de longitud, y se evaluaron con el programa libre ImagenJ (<https://imagej.nih.gov/ij/>), expresando los resultados en cm. Schenider *et al.* (2012) proporcionan más información acerca del uso del software ImagenJ en análisis de imágenes durante 25 años.

1.4.5.6. Crecimiento relativo

Generalmente, el crecimiento se determina mediante medidas directas (altura de la planta, diámetro del tallo, número de hojas, área foliar, masa seca) e indirectas como la tasa de asimilación neta, tasa de crecimiento del cultivo, tasa relativa de crecimiento, etc. (Barraza *et al.*, 2004). En esta investigación de medir la longitud de vástago y radícula (parámetros directos del crecimiento), se determinaron los crecimientos relativos de estos órganos, dado que Díaz de Villegas *et al.* (2011) indican que estos parámetros junto con el porcentaje relativo de germinación (PGR), son indicadores de efectos bioestimulantes o fitotóxicos, en este caso de las distintas dosis de Ce. Para la determinación del crecimiento relativo de vástago o raíz se utiliza la siguiente fórmula reportada por Tam y Tiquia (1994):

$$CRV \text{ o } CRR = \frac{LPOC_{Ce}}{LPOC_T} \times 100$$

Donde $LPOC_{Ce}$ es el promedio de la longitud del órgano evaluado, ya sea vástago o radícula en alguno de los tratamientos de Ce, LPO_T es el promedio de la longitud del órgano evaluado en el tratamiento testigo.

1.4.5.7. Biomasa seca

Se tomó el peso total de la plántula y posteriormente se fragmentaron los órganos para la determinación del peso fresco de vástago y de radícula; lo anterior, usando una balanza analítica (Adventurer™ Pro, Ohaus, USA). Posteriormente, las muestras de cada órgano se colocaron en una estufa con circulación forzada de aire (HCF-125, Riossa, México) a una temperatura de 70 °C durante 48 h; para después realizar la determinación del peso seco de vástago y de radícula.

1.4.6. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos de los datos se realizaron utilizando el sistema de análisis (SAS, versión 9.0; SAS, 2011). Se realizó análisis de varianza y prueba de comparación de medias con la prueba de LSD de Fisher, con un nivel de significancia de alpha de 0.05,

1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de germinación con las distintas concentraciones de Ce.

1.5.1. Incremento porcentual del peso de semilla de tomate después de 12 h de imbibición

La imbibición es un proceso que involucra la absorción de agua por parte de semillas seca, que considera la absorción de agua a través de la pared celular y macromoléculas protoplásmica (Seethalakshmi y Umarani, 2018). En este estudio, la **Figura 1.1** presenta los resultados del incremento porcentual en peso de las semillas después de un periodo de 12 h en imbibición; dicho incremento es un reflejo, por tanto, de la absorción de agua.

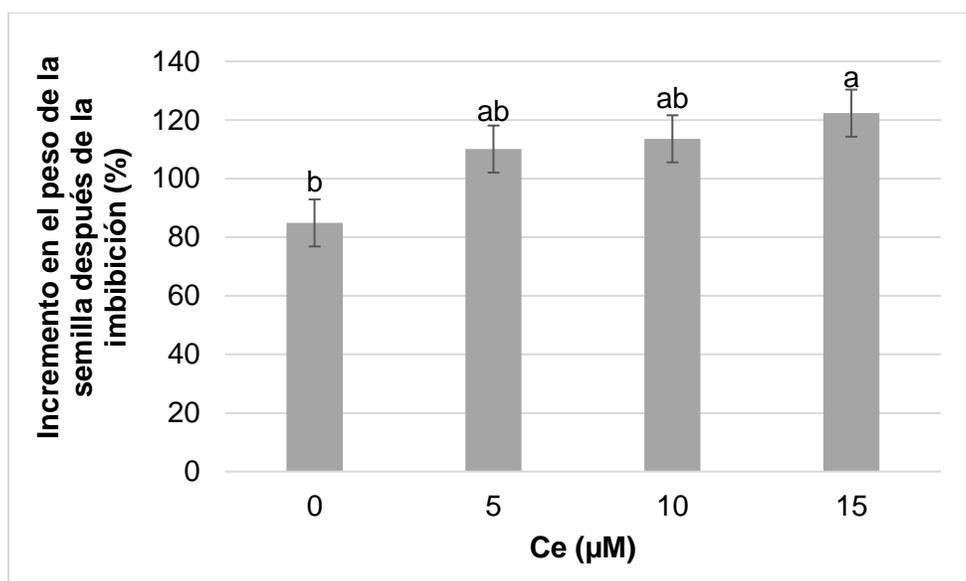


Figura 1.1. Incremento porcentual del peso de semilla de tomate cv. Vengador, después de 12 h de imbibición en soluciones con diferentes concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

Los incrementos porcentuales en el peso de semilla después del proceso de imbibición mostraron diferencias estadísticas entre tratamientos. Se observó una relación positiva entre la concentración de Ce y el incremento porcentual en peso de la semilla; sin embargo, solo el tratamiento con la dosis de 15 μM Ce fue estadísticamente mayor al testigo, superándolo en casi 37.5% (**Figura 1.1**). [Zhang et al. \(2013\)](#) reportan que los elementos de las tierras raras mejoran el vigor de la semilla, la absorción de agua y la permeabilidad de la membrana citoplasmática de las semillas de plantas medicinales durante la imbibición y la germinación; lo cual es coincidente con los resultados aquí obtenidos.

1.5.2. Coeficiente de velocidad de germinación (CVG)

El coeficiente de velocidad de germinación es un parámetro que proporciona información acerca de la rapidez de la germinación, su valor incrementa cuando el número de semillas germinadas aumenta y el tiempo requerido para la germinación se reduce ([Al-Mudaris, 1998](#)). En este sentido, este parámetro es de suma importancia, dado que determina el tiempo de producción de plántulas y por tanto, de trasplante en campo ([Sobrevilla-Solis et al. 2013](#)).

De acuerdo con [Sánchez et al. \(2015\)](#); los valores del CVG van de 0 a 1, donde valores altos o tendientes a 1 indican germinación rápida; por el contrario, valores tendientes o cercanos a 0 indican que la germinación es muy lenta o bien que ésta fue inhibida; en este caso, los valores del coeficiente fueron multiplicados por 100 (valores de 0 a 100), siendo entonces, éste el valor más alto que puede tener esta variable. Los valores obtenidos para el coeficiente de velocidad de germinación no mostraron diferencia significativa entre las semillas tratadas con H_2O destilada y las que contenían Ce (**Cuadro 1.2**); sin embargo, se puede indicar que la germinación fue más rápida en el tratamiento con 5 μM Ce, seguido del testigo; por el contrario, se observó una germinación más lenta en el tratamiento 10 μM Ce.

Cuadro 1.2. Coeficiente de velocidad de germinación de semillas de tomate cv. Vengador, tratadas con diferentes concentraciones de Ce durante la fase de imbibición.

Ce (μM)	Coefficiente de velocidad de germinación
0	48.33 \pm 0.68 a
5	50.78 \pm 3.76 a
10	44.30 \pm 2.82 a
15	47.54 \pm 1.52 a

Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.5.3. Porcentaje de germinación relativa (PGR)

Después de siete días, los porcentajes de germinación en los tratamientos 0, 5, 10 y 15 μM Ce fueron de 95, 93.3, 91.7 y 95, respectivamente; estos valores no fueron diferentes desde el punto de vista estadístico. Estos resultados coinciden con los reportados por [Andersen et al. \(2016\)](#), quienes no encontraron efectos significativos en la germinación de semillas de col, zanahoria, maíz, pepino, lechuga, avena, cebolla, soya, pasto rye Grass, y tomate, cuando fueron tratadas con nanopartículas de Ce (nCeO_2) en concentraciones oscilando de 250 a 1000 mg L^{-1} . De igual manera, [Barbieri et al. \(2013\)](#) reportaron que la inmersión de semillas de lechuga en $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$ a concentraciones de 5 a 25 mg L^{-1} (9.1 a 45.6 μM de Ce), no afectó el porcentaje de germinación, pero si mejoró el crecimiento inicial de las plántulas.

Por otra parte, el porcentaje de germinación relativa estimado después de siete días del inicio del experimento, indicaron que no existieron efectos significativos entre tratamientos, lo que se puede observar en el **Cuadro 1.3**; no obstante, es importante destacar que el tratamiento con 5 μM Ce incrementó en 3.5% la germinación, respecto al testigo. En este mismo sentido, [Fashui et al. \(2002\)](#) reportó incrementos significativos en la germinación de semillas de arroz tratadas con Ce en un rango de 2.5 a 20 $\mu\text{g mL}^{-1}$ suministrado a partir de Ce $(\text{NO}_3)_3$. Recientemente, [Ramírez-Olvera et al. \(2018\)](#), también en arroz y evaluando dosis de $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ similares a las de este estudio (4, 8, y 12 μM), reportan incrementos significativos en la germinación.

Cuadro 1.3. Porcentaje de germinación relativa de semillas de tomate cv. Vengador, tratadas con diferentes concentraciones de Ce durante la fase de imbibición.

Ce (μM)	Porcentaje de germinación relativa
0	100.00 \pm 1.75 a
5	103.50 \pm 5.99 a
10	94.73 \pm 3.50 a
15	100.00 \pm 3.36 a

Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.5.4. Longitud de vástago y radícula

La longitud de vástago fue incrementada de manera significativa en los tratamientos con Ce, respecto al testigo. Se registraron incrementos del orden de 63.5, 77.5 y 101% en los tratamientos con 5, 10 y 15 μM Ce, respectivamente, en comparación con el testigo (**Figura 1.2**).

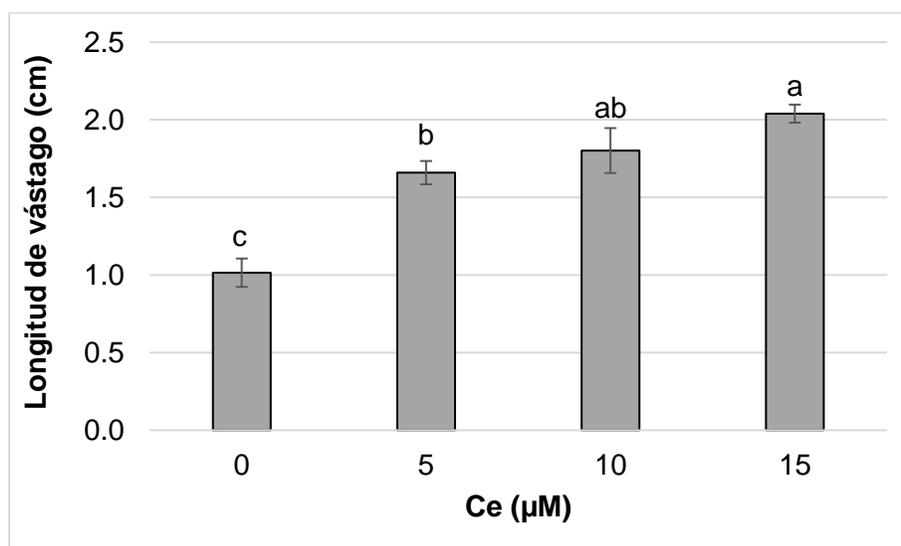


Figura 1.2. Longitud de vástago obtenido de plántulas de tomate cv. Vengador, después de siete días en cámaras de germinación en soluciones con diferentes

concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

La adición de Ce en etapas iniciales del crecimiento mostró un marcado efecto positivo en el crecimiento de las plántulas de tomate en este estudio; esto es coincidente con lo reportado [Ramírez-Olvera et al. \(2018\)](#) en arroz; donde el tratamiento con Ce no solo incrementó el crecimiento inicial; sino también en etapa vegetativa al incrementar de manera significativa el número de macollos de dosis iguales o menores a 12 μM . En este mismo sentido, [Shyam y Aery \(2012\)](#) reportaron estimulación en el crecimiento de vástagos de *Vigna unguiculata*, solo cuando el Ce fue suministrado en dosis iguales o menores a 17.841 μM . [He y Loh \(2000\)](#) en estudios realizados en *Arabidopsis thaliana*, reportaron que el tratamiento con 0.5 μM $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$, incrementó en 60.8% la altura de planta. Por el contrario, en plántulas *in vitro* de *Medicago arborea*, no se observó diferencia significativa en el alargamiento relativo de los brotes en los grupos tratados con nanopartículas de Ce en concentraciones de 20, 40 y 80 μM ([Gomez-Garay et al., 2014](#)).

Por otra parte, la longitud de la radícula fue significativamente menor en el tratamiento con 5 μM Ce, respecto al testigo; con una disminución en el crecimiento de radícula de 27.4% (**Figura 1.3**). Se observó también que, de manera general, el tratamiento con Ce inhibió el crecimiento de radícula; sin embargo, destaca el hecho de que la inhibición se relacionó de manera inversa con la concentración de Ce suministrada; lo que indica que este efecto es dependiente de la dosis de Ce. [Shyam y Aery \(2012\)](#) reportaron efectos diferenciales del Ce en el crecimiento de raíces de *V. unguiculata*, en función de su concentración; observando que valores de 0.713, 3.568 y 17.841 μM Ce ocasionaron incrementos en el crecimiento de la raíz; éstos del orden del 20.5, 39.7, 67.1%, respectivamente. Incremento en las dosis de Ce a 89.2 y 446.0 μM , por el contrario, inhibe el crecimiento de radícula en 38.4 y 49.3%, respectivamente. Estos autores concluyeron también, que altas concentraciones de Ce afectan más adversamente el crecimiento de la raíz que del vástago. El efecto negativo del Ce en el crecimiento de la raíz es atribuido a la reducción en la tasa de división celular en las raíces ([d'Aquino et al., 2009](#)).

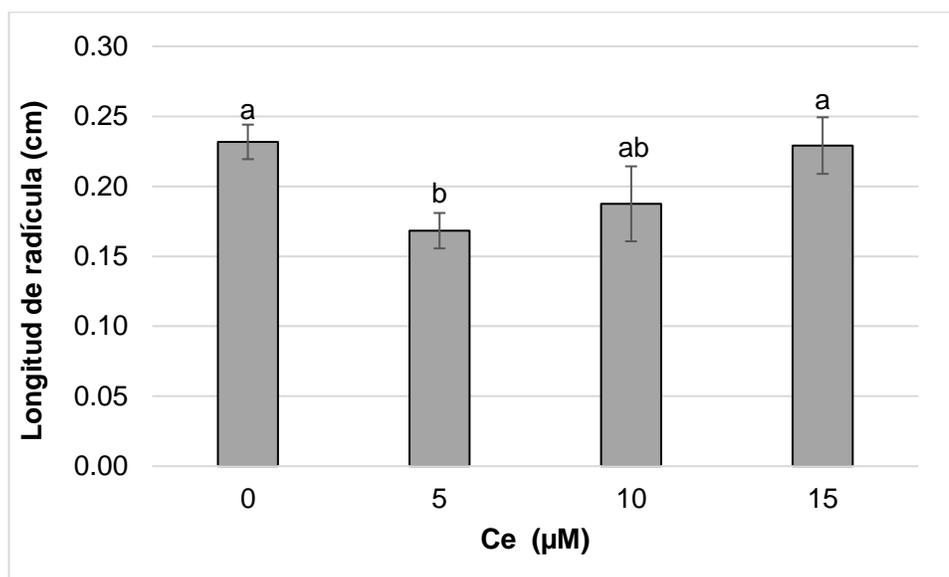


Figura 1.3. Longitud de radícula de plántulas tomate cv. Vengador, tratadas con diferentes concentraciones de Ce durante la fase de imbibición. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

Es pertinente indicar que la dosis de Ce que puede inhibir o estimular el crecimiento, es dependiente de la especie vegetal; por ejemplo, en arroz dosis de este elemento en el intervalo de 4 a 12 μ M incrementan significativamente el crecimiento tanto de vástago como de raíz ([Ramírez-Olvera et al., 2018](#)).

1.5.5. Crecimiento relativo de vástago y radícula

Los resultados obtenidos en la variable crecimiento relativo de vástago evidencian los efectos positivos del Ce (**Figura 1.4**), al observarse relación directa entre las dosis de Ce y el crecimiento en el vástago. En el tratamiento con 15 μ M Ce se observó un crecimiento del orden de dos veces respecto al testigo. Estos resultados indican un efecto bioestimulante del Ce en el crecimiento del vástago en las dosis estudiadas; es decir, las dosis ensayadas bajas desencadenan respuestas positivas, lo que es conocido por efecto hormético ([Lushchak, 2014](#)).

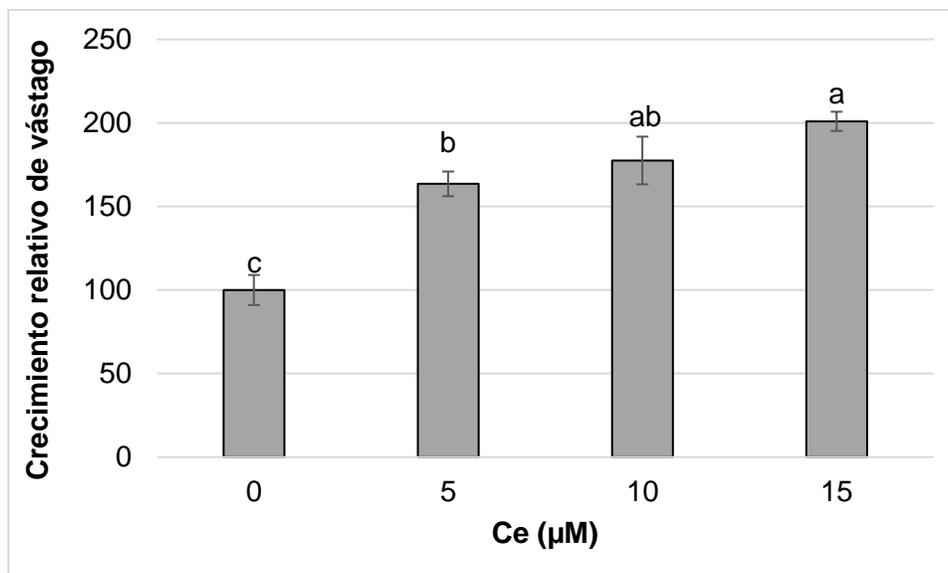


Figura 1.4. Crecimiento relativo de vástago obtenido de plántulas tomate cv. Vengador después de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

La hormesis se ha considerado básicamente como la relación dosis-respuesta en la cual los efectos a bajas dosis son opuestos a los efectos a altas dosis (Lopez *et al.*, 2013). En otros estudios con Ce, se han hecho evidentes las respuestas horméticas. En *V. unguiculata*, el rendimiento relativo del vástago estimado a partir de pesos de biomasa seca, indicó que dosis de Ce entre 0.713 y 17.841 μ M a partir de $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ promueven la acumulación de materia seca; mientras que, dosis iguales o superiores 17.841 μ M Ce causan efectos negativos en esta variable (Shyam y Aery, 2012).

La respuesta de crecimiento relativo descrita en vástagos no es observada en radícula; donde, si bien no existieron diferencias estadísticas entre tratamientos, se observan valores decrecientes en esta variable en los tratamientos con Ce, particularmente en las dosis 10 y 15 μ M (Cuadro 1.4).

Cuadro 1.4. Crecimiento relativo de radícula obtenido de plántulas tomate cv. Vengador después de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce.

Ce (μM)	Crecimiento relativo de radícula
0	100.00 \pm 6.54 a
5	99.25 \pm 5.65 a
10	87.22 \pm 4.00 a
15	92.25 \pm 4.18 a

Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

Zhang *et al.* (2013) indican que los elementos de las tierras raras (REEs) participan en la formación de raíces adventicias, diferenciación celular y morfogénesis de la raíz. Por efecto de estos elementos, también se han observado incrementos en la longitud de raíz en distintas especies. Efectos positivos de nanopartículas de Ce en el crecimiento de raíces fueron reportados en *Medicago arborea*, en las dosis 100, 200 y 400 mg L⁻¹; por el contrario, el suministro de Ce a granel solo incrementó significativamente esta variable con la dosis más alta, en comparación con el testigo (Gomez-Garay *et al.*, 2014).

1.5.6. Índice de germinación

El índice de germinación, según Emino y Warman (2004) es un indicador del grado de fitotoxicidad (valores menores a 50% indican alta toxicidad; valores de 50 a 80% indican fitotoxicidad moderada), la ausencia de ésta (valores de 80 a 100%); o bien es un indicador de bioestimulación (valores mayores de 100%). Este parámetro ha sido de utilidad al evaluar los efectos de los metales; por ejemplo, se ha empleado en la evaluación de la fitotoxicidad de Fe iónico, micro y nanonizado en tres especies de macrófitas *Lepidium sativum*, *Sinapis alba* y *Sorghum saccharatum* (Libralato *et al.*, 2016); y recientemente, para evaluar los efectos de los metales Cd, Tl y V en la germinación de tres variedades de chile (Buendía-Valverde *et al.*, 2018).

En este estudio, el índice de germinación en el tratamiento con 10 μM Ce fue reducido en un 17.53% siendo este resultado, estadísticamente distinto al resto de tratamientos; por el contrario, se observó en el tratamiento 5 μM un índice superior a 100% (101.93%); que, si bien no es diferente estadísticamente al testigo, representaría un efecto bioestimulante del Ce (**Figura 1.5**). [López-Moreno et al. \(2010\)](#) observaron una moderada toxicidad causada por el Ce, en la germinación de la semilla de alfalfa, pepino, tomate y maíz a concentraciones mayores de Ce que los evaluados dentro de este estudio en este estudio (500, 1,000 y 2,000 mg L^{-1}). Los resultados en el presente estudio sugieren que a las concentraciones probadas de CeCl_3 no causaron toxicidad en la germinación de la semilla de tomate.

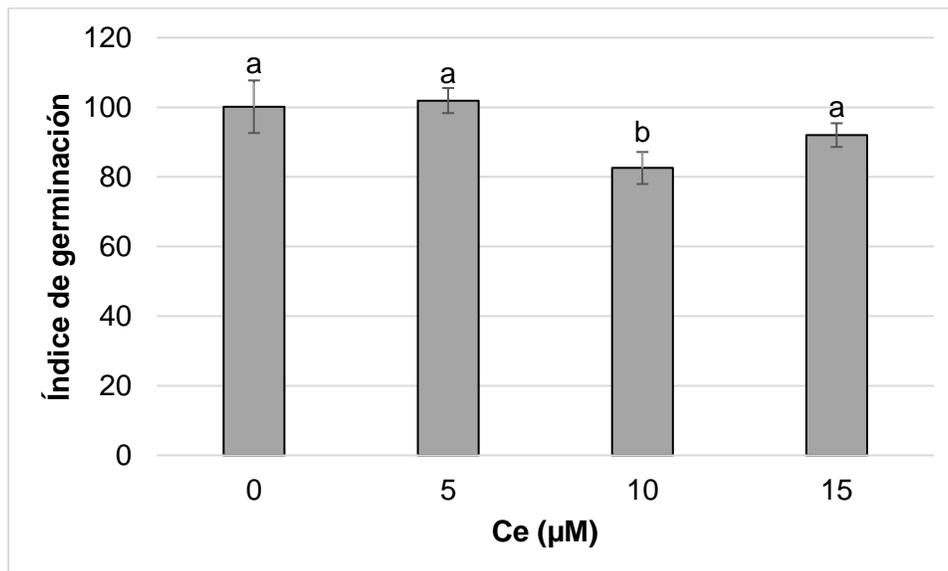


Figura 1.5. Índice de germinación en obtenido de plántulas tomate cv. Vengador, evaluado en un periodo de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.5.7. Biomasa seca total, vástago y radícula

En la biomasa seca de vástago los tratamientos con las distintas dosis de Ce fueron superiores estadísticamente comparados con el testigo, obteniendo el mayor peso de biomasa seca en el tratamiento con el nivel más alto de Ce (**Figura 1.6**).

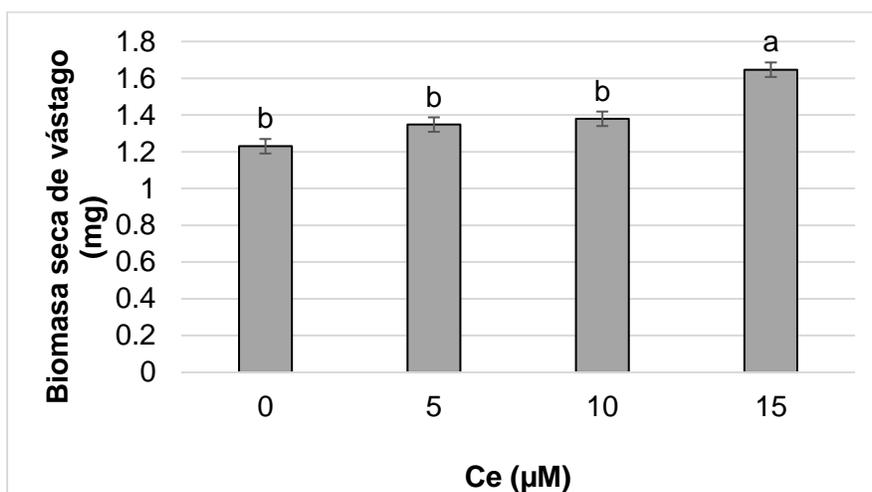


Figura 1.6. Biomasa seca de vástago obtenida de plántulas de tomate cv. Vengador, después de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

En lo que respecta a la biomasa seca de radícula no existe diferencia significativa entre tratamientos (**Cuadro 1.5**).

Cuadro 1.5. Biomasa seca de radícula obtenida de plántulas de tomate cv. Vengador, después de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce.

Ce, µM	Biomasa seca de radícula (mg)
0	0.23 \pm 1.25 a
5	0.17 \pm 1.73 a
10	0.18 \pm 2.58 a
15	0.22 \pm 2.02 a

Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

El peso de biomasa seca total los tratamientos con 15 μ M Ce fue superior al resto de los tratamientos (**Figura 1.7**).

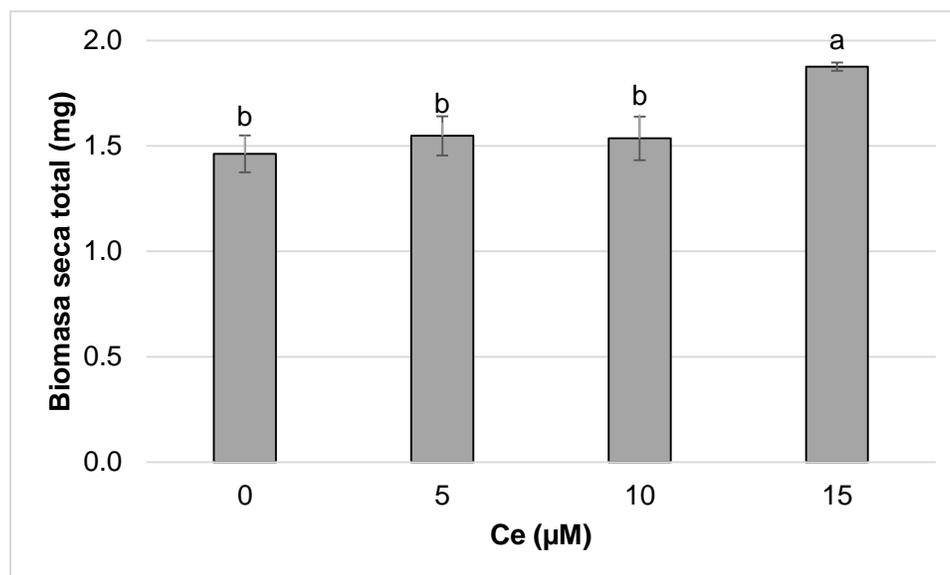


Figura 1.7. Biomasa seca de total de plántulas de tomate cv. Vengador, después de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

Ramírez-Olvera *et al.* (2018) reportaron que el peso de biomasa fresca y seca de vástago y raíz de plántulas de arroz incrementó en más del doble con la aplicación de Ce, respecto al control. En este mismo sentido, en plántulas de arroz, la adición de $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ a dosis entre 5 y 15 mg mL^{-1} , incrementó en más del 50% el peso seco de plántula (Fashui *et al.*, 2002). Morales *et al.* (2013) reportaron que la producción de biomasa de plantas de cilantro de 30 días de edad incrementó significativamente, cuando fueron tratadas con nanopartículas de CeO_2 en dosis de 125 mg kg^{-1} ; asimismo, tuvieron brotes significativamente más largos que las plantas del tratamiento testigo. Barbieri *et al.* (2013) indicaron en plántulas de lechuga, que la aplicación de $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$ en dosis entre 5 y 25 mg L^{-1} , incrementaron el peso de la biomasa seca. Wu *et al.* (2014) indican que estos aumentos en las biomásas

secas podrían deberse a un incremento en los procesos fotosintéticos ocasionado por el Ce, que se refleja en una mayor producción de biomasa.

En contraste a los resultados obtenidos en esta investigación, [Hu et al. \(2002\)](#) encontraron que el Ce causó reducción de los rendimientos relativos de materia seca de vástagos y raíces, cuando éste es aplicado a partir de CePO_4 en dosis de 2 a 25 mg L^{-1} . En vástagos, el tratamiento con 25 mg Ce L^{-1} durante 7 y 16 días, ocasión rendimientos relativos de 88.5 y 78.9%; mientras en raíces fueron de 58.2 y 65.4%. Por otra parte, [Diatloff et al. \(2008\)](#) indicaron que el peso seco del vástago de maíz no se vio afectado por las concentraciones de Ce hasta 0.9 μM ; sin embargo, al aumentar la concentración a 5 μM se redujo significativamente el peso seco del vástago en 32%.

En la **Figura 1.8** se presentan los resultados obtenidos al estimar la relación de pesos de biomasa seca de vástago y radícula, mismos que son consistentes con los resultados de biomasa de vástago.

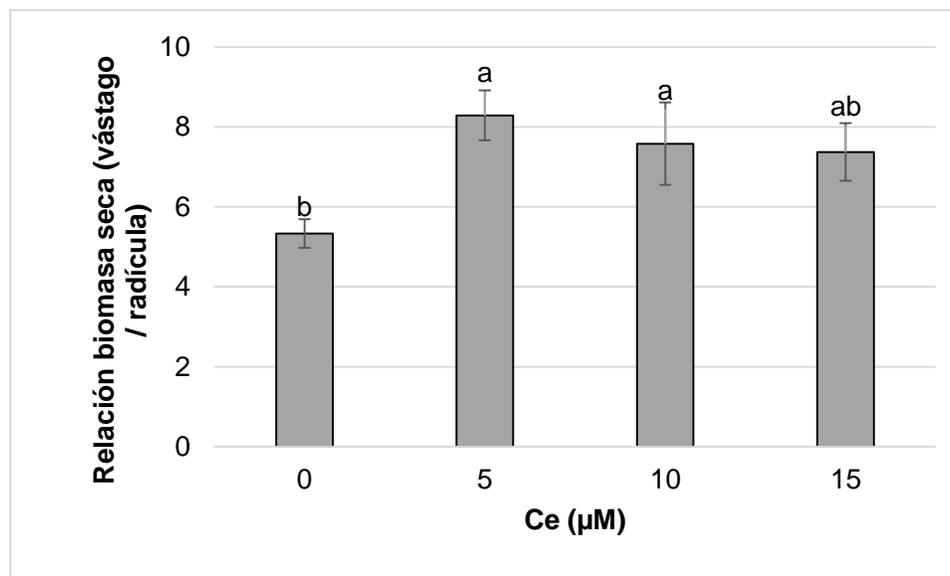


Figura 1.8. Relación biomasa seca de vástago y radícula de plántulas de tomate cv. Vengador, después de siete días en cámaras de germinación bajo soluciones con diferentes concentraciones de Ce. Medias \pm DE con letra distinta, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, 0.05).

1.6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio de germinación permiten concluir que el Ce tiene un efecto estimulante de la germinación y en el crecimiento inicial del vástago en tomate cv. Vengador. En particular, se observa un efecto acondicionante (priming) del Ce en la semilla, reflejado en una mayor ganancia de peso en las semillas tratadas con este elemento lo que indicó mayor absorción de agua. No se observaron efectos significativos en los parámetros de crecimiento de la radícula. Se sugiere en futuros ensayos incrementar las dosis de Ce con la finalidad de definir el intervalo hormético de este elemento en tomate.

1.7. LITERATURA CITADA

- Andersen CP, King G, Plocher M, Storm M, Pokhrel LR, Johnson MG, Rygielwicz PT. 2016. Germination and early plant development of ten plant species exposed to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry* 35(9): 2223-2229. Doi: 10.1002/etc.3374
- Al-Mudaris MA. 1998. Notes on various parameter recording the speed of seedgermination. *In: Der Tropenlandwirt, Beiträge zur tropischen Landwirtschaft und Veterinärmedizin.* 99. Jahrgang. October 98. S. 147-154.
- Anthony JW, Bideaux RA, Bladh KW, Nichols MC. 2000. *Handbook of Mineralogy (Volume IV—Arsenates, Phosphates, Vanadates)*; Mineral Data Publishing: Tuscon, Arizona. 680 p.
- Barbieri APP, Espíndola MCG, de Menezes NL, Henrique DFS. 2013. Tratamento de sementes de alface com soluções aquosas de cério e lantânio. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 43(1): 104-109.
- Barraza F, Fischer G, Cardon CE. 2004. Estudio del proceso de crecimiento del cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el valle del Sinú medio, Colombia. *Agronomía Colombiana* 22(1): 81-90.
- Bewley JD, Black M. 1982. *Physiology and biochemistry of seeds in relation to germination.* Vol. 2. Viability, Dormancy and Environmental Control. Springer-Verlag- Berlin. 304 p.

- Buendía-Valverde ML, Trejo-Téllez LI, Corona-Torres T, Aguilar-Rincón VH. 2018. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. *En prensa*.
- D'Aquino L, de Pinto MC, Nardi L, Morgana M, Tommasi F. 2009. Effect of some light rare earth elements on seed germination, seedling growth and antioxidant metabolism in *Triticum durum*. *Chemosphere* 75: 900-905. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.01.02
- Díaz de Villegas ME, Delgado G, Rivas M, Torres E, Saura M. 2011. Implementation of an *in vitro* bioassay as an indicator of the bionutrient FitoMas E. *Ciencia e Investigación Agraria* 38(2): 205-210. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-16202011000200005>.
- Diatloff E, Smith FW, Asher CJ. 2008. Effects of Lanthanum and Cerium on the Growth and Mineral Nutrition of Corn and Mungbean. *Annals of Botany* 101(7): 971-982. Doi: 10.1093/aob/mcn021
- Du X, Graedel TE. 2011. Global rare earth in-use stocks in NdFeB permanent magnets. *Journal of Industrial Ecology* 15(6): 836-843. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00362.x>Emi
- Emino ER, Warman PR. 2004. Biological assay for compost quality. *Compost Science and Utilization* 12(4): 342-348. Doi: 10.1080/1065657X.2004.10702203
- Fashui H. 2002. Study on the mechanism of cerium nitrate effects on germination of aged rice seed. *Biological Trace Element Research* 87(1-3): 191-200. Doi: 10.1385/BTER: 87:1-3:191
- Fashui H, Ling W, Xiangxuan M, Zheng W, Guiwen Z. 2002. The effect of cerium (III) on the chlorophyll formation in spinach. *Biological Trace Element Research* 89(3): 263-276. <https://doi.org/10.1385/BTER:89:3:263>
- Gardner FP, Pearce RB, Mitchell RL. 2003. *Physiology of crop plants*. Blackwell Publishing Company. Iowa, USA. 326 p.
- Gomez-Garay A, Pintos B, Manzanera JA, Lobo C, Villalobos N, Martín L. 2014. Uptake of CeO₂ nanoparticles and its effect on growth of *Medicago arborea in vitro* plantlets. *Biological Trace Element Research* 161: 143-150. 43–150. Doi: 10.1007/s12011-014-0089-2

- Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI, Cuacua-Temiz C, Jácome-Chacón MA, Senties-Herrera H. 2015. Los elementos benéficos: potencial para innovar la producción agrícola. *Agroentorno* 166: 19-20.
- Gonzalez V, Vignati DAL, Leyval C, Giamberini L. 2014. Environmental fate and ecotoxicity of lanthanides: Are they a uniform group beyond chemistry? *Environmental International* 71: 148-157. Doi: 10.1016/j.envint.2014.06.019
- González-Zertuche L, Orozco-Segovia A. 1996. Métodos de análisis de datos en la germinación de semillas, un ejemplo: *Manfreda brachustachya*- *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 58: 15-30.
- Hayes-Labruto L, Schillebeeckx SJD, Workman M, Shah N. 2013. Contrasting perspectives on China's rareearth policies: Reframing the debate through a stakeholder lens. *Energy Policy* 63: 55-68. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.121>
- He YW, Loh CS. 2000. Cerium and lanthanum promote floral initiation and reproductive growth of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science* 159: 117-124. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(00\)00338-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00338-1)
- Hedrick JB. 2004. Rare earths: U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, Vol. I, pp. 60.1-60.16.
- Hu X, Ding Z, Chen Y, Wang X, Dai L. 2002. Bioaccumulation of lanthanum and cerium and their effects on the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Chemosphere* 48: 621-629.
- Islam S, Mia A, Hossain T, Ahmed J, Khan H. 2012. Priming on embryo emergence and seedling vigor of small-fruited bitter melon (*Momordica charantia* L.) under suboptimal temperature. *International Journal of Agricultural Science and Research* 2(3): 1-10.
- Libralato G, Costa-Devoti A, Zanella M, Sabboni E, Mičetić I, Manodori L, Pigozzo A, Manenti S, Groppi F, Ghirardini AV. 2016. Phytotoxicity of ionic, micro- and nano-sized iron in three plant species. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 123: 81-88. Doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.07.024
- López-Moreno ML, De la Rosa G, Hernández-Viezcas JA, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL. 2010. XAS corroboration of the uptake and storage of

- CeO₂ nanoparticles and assessment of their differential toxicity in four edible plant species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58(6): 3689-3693. Doi: 10.1021/jf904472e.
- López NE, González VY, Hernández RJ, Alarcón A, Luna A, Königsberg M. 2013. Hormesis: What doesn't kill you makes you stronger, *Gaceta Médica de México* 149(4): 438-447.
- Lushchak VI. 2014. Dissection of the hormetic curve: Analysis of components and mechanisms. *Dose-Response* 12: 466-479. Doi: 10.2203/dose-response.13-051.Lushchak.
- Ma Y, Kuang L, He X, Bai W, Ding Y, Zhang Z, Zhao Y, Chai Z. 2010. Effects of rare earth oxide nanoparticles on root elongation of plants, *Chemosphere* 78(3): 273-279. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.10.050
- Morales MI, Rico CM, Hernandez-Viezcas JA, Nunez JE, Barrios AC, Tafoya A, Flores-Marges JP, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL. 2013. Toxicity assessment of cerium oxide nanoparticles in cilantro (*Coriandrum sativum* L.) plants grown in organic soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61(26): 6224-6230. Doi: 10.1021/jf401628v
- Ramírez-Olvera SM, Trejo-Téllez LI, García-Morales S, Pérez-Sato JA, Gómez-Merino FC. 2018. Cerium enhances germination and shoot growth, and alters mineral nutrient concentration in rice. *PLoS ONE* 13(3): e0194691. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194691>
- Ramos SJ, Dinali GS, Oliveira C, Martins GC, Moreira CG, Siqueira JO, Guilherme LRG. 2016. Rare Earth Elements in the Soil Environment. *Current Pollution Reports* 2(1): 28-50. <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0026-4>
- Sánchez JA, Montejó L, Gamboa A, Albert PD, Hernández F. 2015. Germinación y dormancia de arbustos y trepadoras del bosque siempreverde de la Sierra del Rosario, Cuba. *Pastos y Forrajes* 38(1): 11-28.
- SAS Institute Inc. 2011. *SAS/STAT Users Guide*. Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA. 2323 p.
- Schneider CA, Rasband WS, Eliceir KW. 2012. NH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods* 9(7): 671-675.

- Seethalakshmi S, Umarani R. 2018. Biochemical changes during imbibition stages of seed priming in tomato. *International Journal of Chemical Studies* 6(3): 454-456.
- Shyam R, Aery NC. 2012. Effect of cerium on growth, dry matter production, biochemical constituents and enzymatic activities of cowpea plants [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 12(1): 1-14. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012000100001>
- Sobrevilla-Solis JA, López-Herrera M, López-Escamilla AL, Romero-Bautista L. 2013. Evaluación de diferentes tratamientos pregerminativo y osmóticos en la germinación de semillas *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. Ex Willd) M. C. Johnston. *In: Pulido-Flores G, Monks S (eds.). Estudios científicos en el estado de Hidalgo y zonas aledañas, Vol. II. Zea Books, Lincoln, NE, USA. Pp.83-95.*
- Tam NFY, Tiquia SM. 1994. Assessing toxicity of spent pig litter using seed a germination technique. *Resources, Conservation Recycling* 11(1-4): 261-274. Doi: 10.1016/0921-3449(94)90094-9
- Tyler G. 2004. Rare earth elements in soil and plant systems- A review. *Plant and Soil* 267: 191-206. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-4888-2>
- Weeks ME. 1932. The discovery of the elements. XVI. The rare earth elements. *Journal of Chemical Education* 9(10): 1751-1773. Doi: 10.1021/ed009p1751
- Wu M, Wang PY, Sun LG, Zhang JJ, Yu J, Wang YW. 2014. Alleviation of cadmium toxicity by cerium in rice seedlings is related to improved photosynthesis, elevated antioxidant enzymes and decreased oxidative stress. *Plant Growth Regulation* 74(3): 251-260. Doi: 10.1007/s10725-014-9916-x
- Zhang C, Li Q, Zhang M, Zhang N, Li M. 2013. Effects of rare earth elements on growth and metabolism of medicinal plants. *Acta Pharmaceutica Sinica B* 3(1): 20-24. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2012.12.005>

CAPÍTULO II. CERIO EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE

2.1. INTRODUCCIÓN

En México, el tomate o jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la segunda hortaliza más importante después del chile (*Capsicum annuum* L.), su importancia radica en que posee cualidades esenciales para adecuarse a la dieta alimenticia, sea por su consumo en fresco o procesado. Desde el punto de vista económico, el alto valor de producción y la demanda de mano de obra que genera, hacen del tomate el principal producto hortícola de exportación (Muñoz-Ramos, 2009).

Por otra parte, en el ámbito de la nutrición de cultivos, los elementos benéficos se perfilan como moduladores del metabolismo primario y secundario, y sus efectos se han evidenciado a nivel fisiológico, bioquímico y molecular (Alcántar-González y Trejo-Téllez, 2013). Dentro de éstos, elementos como el cerio (Ce), pueden mejorar indicadores de crecimiento y desarrollo, y detonar ciertos mecanismos de respuesta a diferentes tipos de factores de estrés tanto de naturaleza biótica (insectos plaga y microorganismos patógenos) como abiótica (sequía, salinidad o frío), por lo que se les ha clasificado como elementos benéficos (Gómez-Merino *et al.*, 2015). El Ce pertenece al grupo de los elementos de tierras raras (REEs), éstos son bastante abundantes en la naturaleza y beneficiosos para el crecimiento de las plantas (Liu *et al.*, 2012). Con respecto al efecto de Ce en las plantas, investigaciones anteriores sugirieron que los efectos de este metal a bajas concentraciones son positivos y sólo exhiben efectos fitotóxicos a concentraciones muy altas (López-Moreno *et al.*, 2010).

En el contexto anterior, este estudio tuvo como objetivo evaluar los efectos que la adición de Ce a bajas concentraciones a la solución nutritiva de Steiner empleada en la producción del tomate, tiene en parámetros de crecimiento, nutrimentales y de calidad de fruto de esta especie.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1. Ubicación del experimento

El experimento fue desarrollado en un invernadero baticenital perteneciente al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, localizado en la región oriente del Estado de México, en Montecillo, Estado de México con coordenadas geográficas 19.52° LN, 98.88° LO y altitud de 2,250 m.

2.2.2. Material vegetal

Se utilizó semilla de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Vengador de la casa comercial Syngenta de la variedad denominada Roma o Saladette, el cual presenta las siguientes características: tomate indeterminado altamente productivo ideal para producción en invernadero, el fruto es elongado, presenta un paquete de resistencia a enfermedades con una alta resistencia a *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* y una resistencia intermedia al virus del rizado amarillo en las hojas del tomate o también conocido por sus siglas en inglés TYLCV (Syngenta, 2018).

2.2.3. Producción de plántulas y trasplante

La siembra de las semillas antes descritas se realizó en charolas de poliestireno de 200 cavidades con dimensiones de 60 x 34 cm, usando turba (Pro-mix®) como sustrato. Desde la siembra y hasta la emergencia, las charolas se regaron con agua; a partir de la emergencia se utilizó en el riego solución nutritiva de Steiner al 25% (Steiner, 1984) y hasta 7 d después de la emergencia. Después de 8 d y hasta el trasplante se utilizó solución nutritiva de Steiner al 50% en el riego. Plántulas de 23 d se trasplantaron en bolsas de polietileno negro con dimensiones 35 x 35 cm (10 L) conteniendo tezontle rojo, con tamaño de partículas < 0.9 cm. Las bolsas fueron perforadas previo al llenado con el sustrato en la parte inferior para permitir el drenaje del exceso de agua.

2.2.4. Diseño de tratamientos y diseño experimental

En este estudio se evaluó el efecto de diferentes concentraciones de Ce adicionadas a la solución nutritiva de Steiner al 100% (Steiner, 1984) utilizada para la producción de tomate. Las concentraciones de Ce evaluadas fueron 0, 5, 10 y 15 μM abastecidas a partir de $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Sigma-Aldrich®). Cada tratamiento tuvo seis repeticiones, la unidad experimental consistió en una planta de tomate dentro de una bolsa con tezontle como sustrato. Se empleó un diseño completamente al azar. La aplicación de los tratamientos inició a los 40 ddt (plantas de 64 d de emergidas) y concluyó a los 166 ddt; es decir, las plantas se trataron durante 126 d. Las soluciones nutritivas conteniendo las diferentes concentraciones de Ce se prepararon con sales grado reactivo (Química Meyer®) y el pH de éstas fue ajustado a un valor de 5.5.

2.2.5. Riegos

Para el suministro de las soluciones nutritivas se instaló un sistema de riego por goteo localizado utilizando tubín y estacas. Se aplicaron seis riegos programados por día con gasto total de 0.8 L en la fase vegetativa. El gasto incrementó a 1.5 L cuando inició la floración, a 2 L al inicio de la fructificación y después de la primera cosecha se aumentó a 2.5 L al día hasta la finalización del experimento.

2.2.6. Podas y tutoreo

Las plantas se condujeron a un solo tallo, para lo cual se eliminaron los brotes axilares del tallo principal durante todo el ciclo de cultivo. Esta práctica se realizó cada semana en forma manual e inició a los 25 ddt. Asimismo, con el objetivo de guiar a la planta de tomate con un solo tallo y mantener el tallo de la planta en posición erguida para lograr un mejor manejo del cultivo, se realizó el tutoreo, éste consistió en colocar en la parte superior de la nave, dos hileras de alambres sujetadas sobre la base de un marco metálico, mismos que sirvieron como soporte para afianzar los cordones de rafia amarrados colocando un anillo debajo de la primera hoja y dándole vueltas en espiral.

2.2.7. Variables evaluadas

2.2.7.1. Variables de crecimiento y reproductivas

2.2.7.1.1. Altura de la planta (AP). Se midió con una cinta métrica donde se consideró la longitud de tallo desde el nivel del sustrato hasta la parte superior de la planta. Se evaluó cada 20 días (44, 64, 84, 104, 124, 144 y 164 ddt).

2.2.7.1.2. Diámetro de tallo (DT). Se consideró la parte basal del tallo como punto de referencia para medir el diámetro de éste usando un vernier digital (Tchibo TCM, D-22290, Germany), se realizaron mediciones de esta variable cada 20 días (44, 64, 84, 104, 124, 144 y 164 ddt).

2.2.7.1.3 Número de flores por racimo (NFR). Se contabilizó el número de flores completamente desarrolladas en cada racimo.

2.2.7.1.4. Número de flores por planta (NFP). Se obtuvo sumando las flores completamente formadas (estructuras completas y maduras) de cada racimo en los que fue evaluado (racimos 1 a 4).

2.2.7.1.5 Porcentaje de amarre de fruto (PAF). Se calculó con base al número de frutos cosechados por planta por el número de flores de la planta, por cien ([Pérez-Barraza et al., 2015](#)).

$$PAF = \frac{\text{Número de frutos cosechados}}{\text{Número de flores por planta}} \times 100$$

2.2.7.2. Variables de rendimiento

2.2.7.2.1 Número de frutos por racimo. Para esta variable se sumaron todos los frutos de cada racimo en todos los tratamientos. Esta evaluación se realizó en los racimos 1 a 3.

2.2.7.2.2. Frutos totales de los racimos. El número de frutos totales se cuantificó sumando los frutos de los racimos 1, 2 y 3.

2.2.7.2.3. Rendimiento en peso por racimo. Para la cuantificación de esta variable se sumaron los pesos de los frutos obtenidos por racimo, empleando una balanza (Ohaus, Adventurer™Pro, USA). Se evaluaron los racimos 1, 2 y 3.

2.2.7.2.4. Rendimiento total por planta. Esta variable se determinó mediante la sumatoria del peso de los tres racimos de todos los tratamientos.

2.2.7.3 Variables de calidad en fruto

La cosecha de frutos se realizó manualmente y por racimo (conforme maduraban los frutos). Se realizaron un total de tres cortes los cuales se llevaron a cabo para todos los tratamientos. Los frutos se cosecharon en el término de rayado (70% o más de su superficie cubierta por color rosa-rojo) hacia maduro (rojo 100%) esto término de colecta fue utilizado para las variables de calidad de frutos y rendimiento.

2.2.7.3.1. Diámetro polar del fruto (mm). Se evaluó en frutos de los racimos 1 a 3. La longitud del fruto se determinó desde la zona del pedúnculo a la zona apical. La medición se realizó con un vernier digital (Tchibo TCM, D-22290, Germany).

2.2.7.3.2. Diámetro ecuatorial del fruto (mm). Cada fruto cosechado de los racimos 1 a 3 fue medido el diámetro de la parte media del fruto con un vernier digital (Tchibo TCM, D-22290, Germany).

2.2.7.3.3. Parámetros de color. Estas variables se midieron en frutos de los racimos 1 al 3, con el uso de un colorímetro (Hunter Lab D25-PC2, Reston, Virginia, USA) se obtuvieron los valores de L, a y b en dos puntos opuestos de la zona ecuatorial de cada fruto para posteriormente hacer un promedio de las mediciones obtenidas de los dos puntos. Con el sistema de coordenadas L, a y b se define un espacio cartesiano en el que L corresponde a la luminosidad, mientras que a y b

corresponden a la cromaticidad. Entonces a define el componente rojo-verde; rojo para los valores positivos y verde para los valores negativos. El parámetro b define el componente amarillo-azul: amarillo para los valores positivos y azul para los negativos. Todos estos valores fueron obtenidos directamente del colorímetro (Francis, 1980; McGuire, 1992). El valor de luminosidad fue tomado directamente dado que corresponde al valor L. Con los valores de a y b se calculó el ángulo de tono o Hue empleando la fórmula siguiente descrita por Little (1975): $(^\circ) = \tan^{-1} (b/a)$. Asimismo, con los valores de a y b se estimó la pureza del color o croma usando la expresión: $\text{croma} = (a^2 + b^2)^{1/2}$ (Wrolstad y Smith, 2010).

2.2.7.3.4. Licopeno

La concentración de licopeno fue estimada usando los parámetros a y b del espacio de color, que se obtuvieron del colorímetro, usando la fórmula siguiente reportada por (Arias *et al.*, 2000): Licopeno (mg 100 g⁻¹ peso fresco "PF") = 11.848 x (a/b) + 1.5471.

2.2.7.3.5. Conductividad eléctrica y pH en jugo de frutos. Se pesaron 5 g del fruto de tomate picados finamente y se colocaron en 25 mL de agua destilada para posteriormente ser pasado a la licuadora para formar una mezcla homogénea a la cual se le tomo un volumen promedio, con la mezcla resultante se le midió directamente la CE y el pH del jugo con un potenciómetro (Conductronic PC-18, México) limpiando el electrodo entre cada medida con agua destilada. Esta evaluación se realizó en frutos de los racimos 1, 2 y 3.

2.2.7.3.6. Pérdida de peso. Esta evaluación se realizó en frutos de los racimos 1 a 3. Los frutos fueron pesados con una balanza (Ohaus, Adventurer™Pro, USA) inmediatamente después de la cosecha (0 días de almacenamiento). Posteriormente los frutos y se almacenamiento a temperatura ambiente en el laboratorio durante 8 d. Transcurrido este periodo se pesaron nuevamente, se calculó la disminución del peso fresco inicial de los frutos y se expresó como porcentaje, de acuerdo con la siguiente ecuación (Navarro-López *et al.*, 2012):

$$Perdida\ inicial = \frac{Peso\ inicial - Peso\ final}{Peso\ inicial} \times 100$$

2.2.7.3.7. Firmeza de fruto (N). En los frutos de los racimos 1, 2 y 3 se evaluó la firmeza en dos puntos, correspondientes a la parte ecuatorial del fruto. La medición se realizó con un texturómetro Chatillon (FDV-30 Greenwich, CT 06836, USA), con puntal cónico de base, el cual fue introducido 1 cm en cada una de las posiciones y se registró la fuerza aplicada para la penetración del fruto, los datos se tomaron directamente del equipo los cuales están expresados en newtons.

2.2.7.3.8. Acidez titulable. Del extracto obtenido para CE y pH se midió el volumen, se filtraron las muestras para a continuación tomar una alícuota de 10 mL a la cual se le agregan 3 gotas de fenolftaleína como indicador y posteriormente se realizó la titulación con NaOH al 0.1 N, la medición de acidez titulable se realizó con base al porcentaje de ácido cítrico, según la metodología de la AOAC (Boland, 1990). El porcentaje de ácido cítrico se calculó empleando la siguiente expresión:

$$\% \text{ del ácido} = \frac{(mL \text{ de NaOH gastados})(N \text{ de NaOH})(Meq)(VT)(100)}{(Alícuota)(Peso \text{ de muestra})}$$

Donde:

N = Normalidad del NaOH.

meq = Miliequivalentes del ácido que se encuentra en mayor proporción en el fruto (ácido cítrico = 0.064)

V = volumen total (mililitros de agua más gramos de fruto).

2.2.7.3.9. Sólidos solubles totales (SST). Se utilizó un refractómetro (Atago pal-1 con escala de 0 a 53%, España), el cual se calibró primero con agua destilada, el índice de refracción del agua es de 1.333 que corresponde al 0% de sólidos solubles (Domene y Segura, 2014), luego se colocó una gota del jugo de tomate y se tomó la lectura, esta determinación se realizó por duplicado. El equipo se lavó con agua destilada entre cada muestra. La concentración en sólidos solubles de los jugos se

expresó en grados Brix. Los grados Brix son una medida de densidad. Un grado Brix es la densidad que tiene a 20°C, una solución de sacarosa al 1 % y a esta concentración corresponde también un determinado índice de refracción (Fernández *et al.*, 2004). Esta evaluación se hizo en frutos provenientes de los racimos 1, 2 y 3.

2.2.7.3.10 Índice de madurez (relación SST/ acidez)

Se calculó con los resultados obtenidos de porcentaje de sólidos solubles totales y el porcentaje de ácido cítrico mediante la siguiente ecuación (Buitrago *et al.*, 2014).

$$IM = \frac{\%SST}{Acidez\ titulable}$$

2.2.7.3.11 Vitamina C

La concentración de ácido ascórbico (AcAsc) se determinó por el método de Tillman o también conocido como 2,6-diclorofenolindo fenol (Boland, 1990), utilizando ácido oxálico como solución extractora. Para ello se tomó una muestra de 10 g por cada fruto teniendo un total de 5 repeticiones de cada tratamiento a evaluar por racimo (1, 2, 3) a los cuales se le adicionaron 30 mL de ácido oxálico 0.5%, la mezcla se homogenizó y filtró. A partir del filtrado se tomó un alícuota de 5 mL que fue titulada con la solución de Tillman, los datos son expresados en mg AcAsc 100 g⁻¹.

La curva de calibración usada en la determinación de vitamina C se presenta en la **Figura 2.1**.

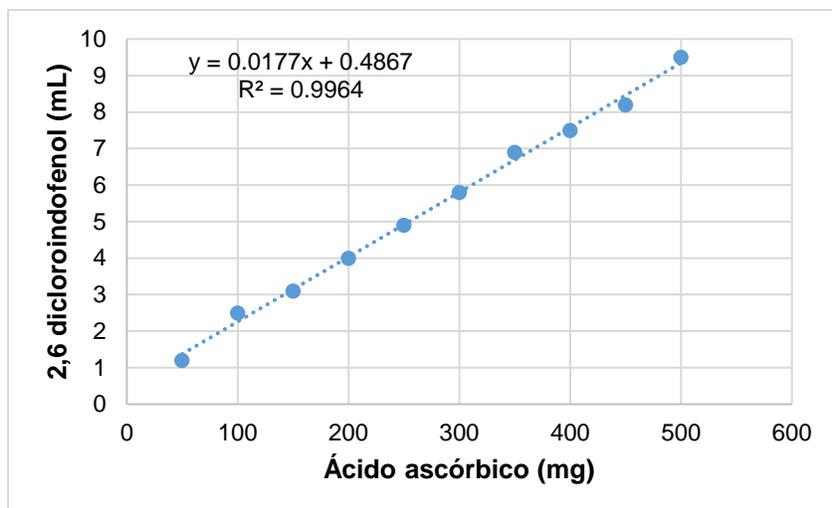


Figura 2.1. Curva de calibración empleada para determinar la concentración de vitamina C en frutos de tomate.

2.2.8. Análisis estadístico

Con los datos obtenidos se hicieron análisis estadísticos con el sistema de análisis SAS, versión 9.0 (SAS, 2011). Se realizó análisis de varianza y prueba de comparación de medias con la prueba de LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. Variables de crecimiento y reproductivas

2.3.1.1. Altura de la planta (AP)

La altura de la planta de manera general aumentó significativamente en los tratamientos con Ce, respecto al testigo sin Ce (**Cuadro 2.1**). Particularmente se advierte el efecto positivo en esta variable con la dosis de Ce de 10 y 15 μM ; con incrementos de 23.5 y 27.7% a los 64 ddt; de 11.7 y 12.5% a los 84 ddt; de 5.4 y 12.5% a los 144 ddt; y de 18 y 14.6% a los 164 ddt; en todos los casos, en comparación con el testigo.

Cuadro 2.1. Altura de plantas de tomate (en m) tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva.

Ce, μM	Días de tratamiento			
	44	64	84	104
0	0.612 \pm 0.025 a	0.765 \pm 0.032 c	1.045 \pm 0.044 b	1.405 \pm 0.048 a
5	0.652 \pm 0.047 a	0.862 \pm 0.041 b	1.145 \pm 0.036 a	1.478 \pm 0.060 a
10	0.630 \pm 0.026 a	0.945 \pm 0.076 a	1.167 \pm 0.048 a	1.428 \pm 0.050 a
15	0.643 \pm 0.046 a	0.977 \pm 0.089 a	1.200 \pm 0.072 a	1.440 \pm 0.090 a

Ce, μM	Días de tratamiento		
	124	144	164
0	1.580 \pm 0.044 c	1.907 \pm 0.046 c	2.153 \pm 0.099 c
5	1.690 \pm 0.043 ab	2.110 \pm 0.074 b	2.342 \pm 0.046 b
10	1.665 \pm 0.097 bc	2.250 \pm 0.067 a	2.483 \pm 0.038 a
15	1.777 \pm 0.098 a	2.185 \pm 0.133 ab	2.508 \pm 0.077 a

Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

El mayor crecimiento de las plantas se observó entre los 64 y 104 ddt en todos los tratamientos; sin embargo, la mayor magnitud del incremento en altura es evidente en los tratamientos con Ce. Ese cambio notorio en la dinámica de crecimiento puede

ser debido a que entre los días mencionados las plantas tenían formados racimos y además estaban en fructificando; es decir, hubo una mayor demanda de fotoasimilados para la formación de frutos (Khan y Sagar, 1967).

Por otra parte, los impactos positivos de REEs en el crecimiento de las plantas pueden estar restringidos a ciertas etapas de crecimiento o condiciones específicas del suelo. Diatloff *et al.* (2008) reportaron que la adición de Ce (0.9 y 2 μM) no aumentó el crecimiento de plantas de maíz (*Zea mays*) y de mungo (*Vigna radiata*) bajo condiciones hidropónicas y que el crecimiento fue incluso inhibido en concentraciones más altas (superiores a 5 μM Ce). La respuesta anterior no se observó en tomate en este estudio; dado que el crecimiento de la planta se relacionó de manera positiva con la concentración de Ce en la solución nutritiva; asimismo, durante todo el ciclo productivo el efecto bioestimulante del Ce en el crecimiento fue observado. Un estudio realizado por Wang *et al.* (2012) en plantas de tomate, reportó que la exposición crónica a nanopartículas de CeO_2 en concentraciones que oscilaron entre 0.1 y 10 mg L^{-1} , no tuvo efectos significativos en la altura de planta. Barrios *et al.* (2016) reportaron que, el tratamiento con nanopartículas de Ce, tanto las nanopartículas no recubiertas como las recubiertas con ácido cítrico afectaron el crecimiento a los 60 días después de la germinación cuando fueron suministradas a plantas de tomate en concentraciones de 62.5 y 125 mg kg^{-1} . Asimismo, a los 210 días después de germinadas las semillas, las plántulas tratadas con la dosis de 500 mg kg^{-1} de nanopartículas no recubiertas y recubiertas con ácido cítrico, incrementaron la altura en 9 y 13%, respectivamente, en comparación con el control.

2.3.1.2. Diámetro de tallo (DT)

El tallo es el soporte de la planta y el sistema distribuidor principal de agua y nutrimentos, de ahí que es importante que se encuentre en las mejores condiciones posibles. Con base a lo anterior, el diámetro del tallo influye de manera significativa en el rendimiento (Stevenson y Mertens, 1980; Adams, 1982).

Los valores de diámetro de tallo no se vieron afectados por las concentraciones de cerio evaluadas como se observa en el **Cuadro 2.2**. En el último muestreo realizado se observan valores de diámetro de tallo que oscilaron entre 2.378 y 2.46 cm. Gaona

y Juárez (2005) reportaron valores medios de diámetro de tallo de 1.49 cm para la variedad Badro que es un tomate tipo bola; mientras que, diámetros de tallos medios de 1.39 cm las variedades Pitenza y 180 que son materiales tipo Saladette. El cultivar Vengador utilizado en este experimento posee un tallo más grueso a las variedades reportadas anteriormente.

Cuadro 2.2. Diámetro de tallo (en cm), de plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva.

Ce, μM	Días de tratamiento			
	44	64	84	104
0	0.613 \pm 0.062 a	0.902 \pm 0.059 a	1.187 \pm 0.083 a	1.447 \pm 0.063 b
5	0.625 \pm 0.097 a	0.905 \pm 0.066 a	1.225 \pm 0.083 a	1.507 \pm 0.065ab
10	0.618 \pm 0.045 a	0.873 \pm 0.057 a	1.223 \pm 0.064 a	1.540 \pm 0.047 a
15	0.633 \pm 0.062 a	0.903 \pm 0.078 a	1.167 \pm 0.110 a	1.497 \pm 0.061 ab

Ce, μM	Días de tratamiento		
	124	144	164
0	1.762 \pm 0.113 a	2.110 \pm 0.090 a	2.378 \pm 0.075 b
5	1.775 \pm 0.062 a	2.102 \pm 0.055 a	2.460 \pm 0.052 a
10	1.792 \pm 0.083 a	2.103 \pm 0.081 a	2.405 \pm 0.062 ab
15	1.800 \pm 0.081 a	2.085 \pm 0.056 a	2.378 \pm 0.056 b

Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

García-Jiménez *et al.* (2017) investigaron el efecto del lantano (La), elemento perteneciente al grupo de las tierras raras al igual que el Ce, en el crecimiento de plántulas de pimienta morrón de las variedades Sven, Sympathy, Yolo Wonder y Zidenka. Se observó que el diámetro del tallo evaluado 15 días después de la aplicación del tratamiento con LaCl_3 fue estadísticamente superior en todas las variedades, con un incremento promedio de 9% en promedio, en comparación con el testigo. En las mediciones realizadas 30 ddt, en las variedades Sven, Sympathy y Zidenka, el La aumentó el diámetro del tallo en 9.8%, en comparación con las plántulas del testigo. De acuerdo con los resultados antes descritos, los elementos

de las tierras raras tienen un efecto bioestimulante en el desarrollo del tallo en Solanáceas como pimiento y tomate bajo las concentraciones de Ce y La que se evaluaron en este estudio y en el de [García-Jiménez et al. \(2017\)](#).

2.3.1.3. Número de flores por racimo (NFR)

El número promedio de flores en los racimos 1 a 4 fue de aproximadamente 6.88, 9.08, 10.25 y 11.17, respectivamente; con un promedio de 9.34 (**Figura 2.2**). [Tagele y Tesfaye \(2017\)](#) reportaron en las variedades Melkashola, Melkasalsa, Marglob mejorado, Roma-VF y Marglob un número medio de flores por racimo de 6.93, 7.20, 4.80, 6.57 y 6.03, respectivamente; por tanto, la variedad Vengador, usada en este experimento tiene un número medio de flores por racimo superior a éstas; por el contrario, [Akand et al. \(2016\)](#) reportan para la variedad Bari-14 de tomate, hasta 11.2 flores por racimo.

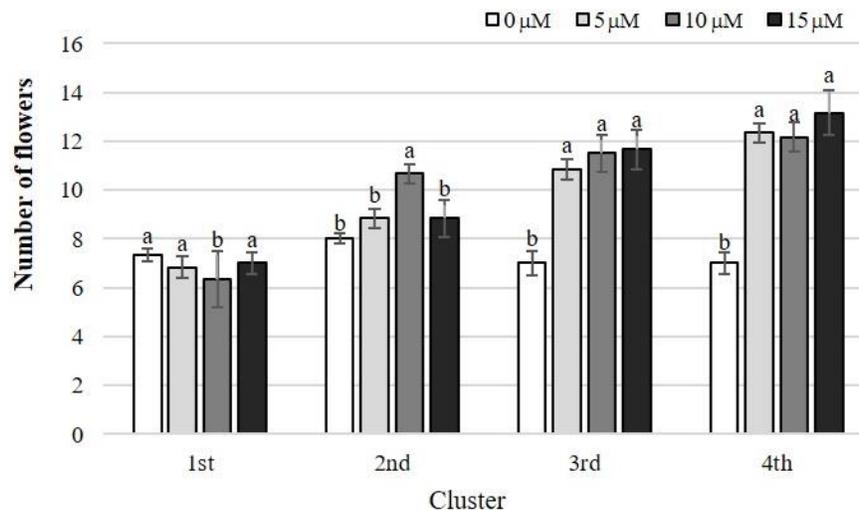


Figura 2.2. Número de flores por racimo en plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Los tratamientos con Ce afectaron de manera significativa el número de flores por racimo; particularmente, se observa en los racimos 3 y 4 efecto benéfico del suministro de Ce, donde incrementó el número de flores en promedio en 4 y 5,

respectivamente, en comparación con el número de flores registrado en plantas del tratamiento testigo (**Figura 2.2**). Diversos autores han mostrado que el número de flores en tomate es dependiente de varios factores, entre ellos la temperatura y humedad relativa (Adams *et al.*, 2001; Shamshiri *et al.*, 2018), el estatus nutrimental y la densidad de siembra (Shanmukhi *et al.*, 2018); lo anterior, regulado por las hormonas vegetales (Sarkar *et al.*, 2014). Entre ellas, las giberelinas (GAs) han mostrado ser esenciales en la inducción de la floración (Achard y Genschik, 2009), además de tener efectos positivos en variables de crecimiento, reproductivas como el número de flores y la calidad de fruto en tomate (Pramanik *et al.*, 2017). En este contexto, se ha reportado el efecto que el La (III), elemento del grupo de las tierras raras al igual que el Ce, tiene en el incremento de la concentración del ácido indol acético (AIA) y de GAs en plántulas de soya sometidas a tratamiento con luz UV-B (Peng y Zhou, 2009). Asimismo, las giberelinas tienen un rol crucial en la mitigación de los efectos causados por la toxicidad de Cd en *Arabidopsis thaliana* (Zhu *et al.*, 2012). Las concentraciones evaluadas de Ce en este estudio no causaron toxicidad; sin embargo, podrían de la misma manera, desencadenar la síntesis de GAs.

2.3.1.4. Número de flores por planta (NFP)

De igual manera que el número de flores por racimo, el número de flores por planta (acumulado de racimos 1 a 4) fue estadísticamente superior al testigo en plantas tratadas con Ce (**Cuadro 2.3**).

Cuadro 2.3. Número de flores totales en los racimos 1 a 4 de plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva.

Ce, μM	Número de flores totales (racimos 1, 2, 3 y 4)
0	29.33 \pm 1.16 b
5	38.83 \pm 1.02 a
10	40.67 \pm 1.76 a
15	40.67 \pm 0.68 a

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

El momento de la transición del crecimiento vegetativo a la floración es fundamental en la agricultura, horticultura y la reproducción de plantas. La inducción de la floración está bajo un control multifactorial ya que existen varios productos químicos que pueden llegar a influir como por ejemplo lo serían los asimilados y fitohormonas (Bernier *et al.*, 1993). Entre estos factores, las citoquininas se consideran una de las más importantes señales fisiológicas que inducen la floración (Bonhomme *et al.*, 2000). Isopentenil adenosina (iPA_{dos}) y triacantanol (TRIA) son citoquininas que tienen propiedades como reguladores de crecimiento en las plantas. Estudios muestran que en *A. thaliana*, una estimulación sinérgica en el crecimiento de la raíz y se observó una mayor floración cuando se aplicó TRIA en presencia de 0.1 μM $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ y 0.1 μM de $\text{La}(\text{NO}_3)_3$. De igual manera se observó una concentración mucho más alta de iPA_{dos} en tejidos de hojas y raíces, cuando TRIA se aplicó de manera conjunta con Ce y La que cuando se suministró sola. Estos resultados muestran que el $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ y el $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ mejoran significativamente los efectos de iPA_{dos} en el crecimiento de la raíz y en la floración en *Arabidopsis thaliana*; de igual manera, demuestran que adiciones de ciertas dosis combinadas de $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ y $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ (0.5 + 0.5 μM , 0.5 + 1.0 μM , 1.0 + 0.5 μM , y 1.0 + 1.0 μM) dan como resultado una floración temprana; siendo la combinación 0.5 + 0.5 mM la más eficiente en la inducción de la floración al producir flores maduras a partir del día 19 después del tratamiento, obteniendo un promedio de 8.3% de flores completamente formadas para este tratamiento; el resto de los tratamientos y el testigo produjeron flores completamente desarrolladas hasta el día 23 (He y Loh, 2000). Agentes no hormonales que promuevan el crecimiento y floración como el caso del Ce que fue evaluado en este estudio, podrían ser muy útiles para muchas especies de importancia económica.

2.3.1.5. Porcentaje de amarre de fruto (PAF)

El amarre del fruto consiste en la conjunción de un estímulo inicial que provoque el crecimiento del ovario y su capacidad de acumular metabolitos, además de una disponibilidad suficiente de éstos (Guardiola, 2000). En el primer racimo no existieron efectos de los tratamientos en el porcentaje de amarre de fruto; por el

contrario, dosis de 10 y 15 μM Ce redujeron significativamente esta variable con comparación con el testigo (**Figura 2.3**). En el segundo racimo, el tratamiento testigo presentó casi 92% de amarre del fruto mientras que en los tratamientos con 10 y 15 μM Ce fue de 75.8 y 56.2%, respectivamente. En el tercer racimo, el amarre de fruto en el testigo fue muy similar al registrado en el segundo racimo (90.6%); mientras que para los tratamientos 10 y 15 μM Ce fue de alrededor de 79.9%.

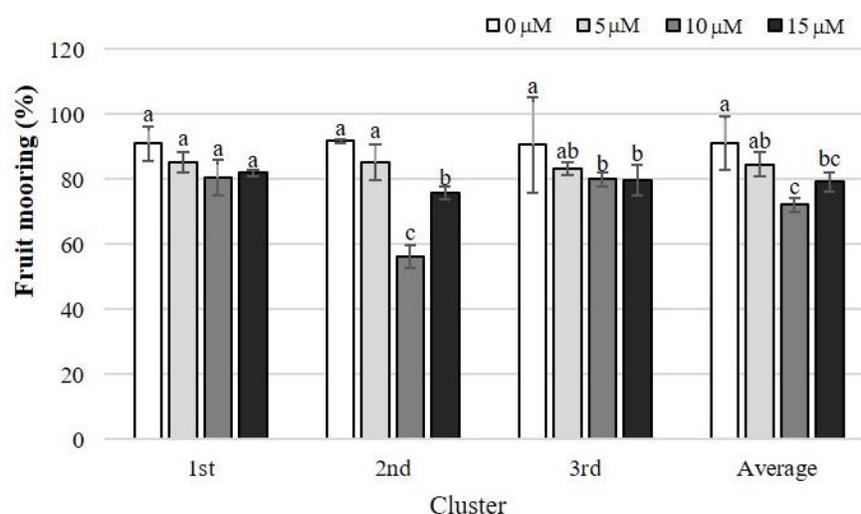


Figura 2.3. Porcentaje de amarre de fruto por racimo en plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

Se observan respuestas diferenciales en el amarre de frutos que son dependientes de la concentración de Ce; es decir altas concentraciones (10 y 15 μM) lo reducen; mientras que la baja concentración evaluada (5 μM) no tiene efectos en comparación con el testigo. Empero, el efecto negativo del Ce en esta variable no es relevante, dado que el Ce incrementó el número de flores (**Figura 2.2, Cuadro 2.3**); lo que permitió observar un incremento en el número de frutos en el racimo 3 (**Figura 2.4**) que impactó positivamente el rendimiento (**Figura 2.6, Cuadro 2.4**), como se evidencia en los apartados siguientes.

2.3.2. Variables de rendimiento

En el análisis del rendimiento de una planta es necesario el estudio de sus componentes del rendimiento; para el caso del tomate, los componentes del rendimiento son el número de frutos por planta y el peso de fruto. Dichos componentes del rendimiento involucran procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento vegetativo y reproductivo, por tanto, está fuertemente influenciado por la relación fuente-demanda en diferentes fases del ciclo de vida de la planta. Esta relación determinará la máxima cantidad de asimilados que producirá la fuente y que aceptará la demanda, y que se puede traducir en una tasa de absorción o incorporación de asimilados por unidad de peso del tejido-demanda, más las pérdidas por respiración ([Wereing y Patrick, 1975](#)). A continuación, se presentan los resultados obtenidos en variables relacionadas con el rendimiento en tomate.

2.3.2.1. Número de frutos por racimo

En la **Figura 2.4** se presentan los resultados de la cuantificación de frutos en los racimos 1 a 3 de tomate, así como el promedio de frutos considerando los tres racimos cosechados. En este estudio con el cv. Vengador, el número de frutos por racimo osciló entre cuatro y nueve, con una media de 6.7 frutos por racimo que se encuentran dentro del rango reportado para otros cultivares de tipo Saladette. [Sarkar et al. \(2014\)](#) reportan el híbrido BARI de tomate de tres a cuatro frutos por racimo; [Ortega-Martínez et al. \(2010\)](#) reportaron un promedio de ocho frutos por racimo para la variedad Sun 7705; [Logendra et al. \(2001\)](#) reportan cuatro frutos por racimo para cv. Laura.

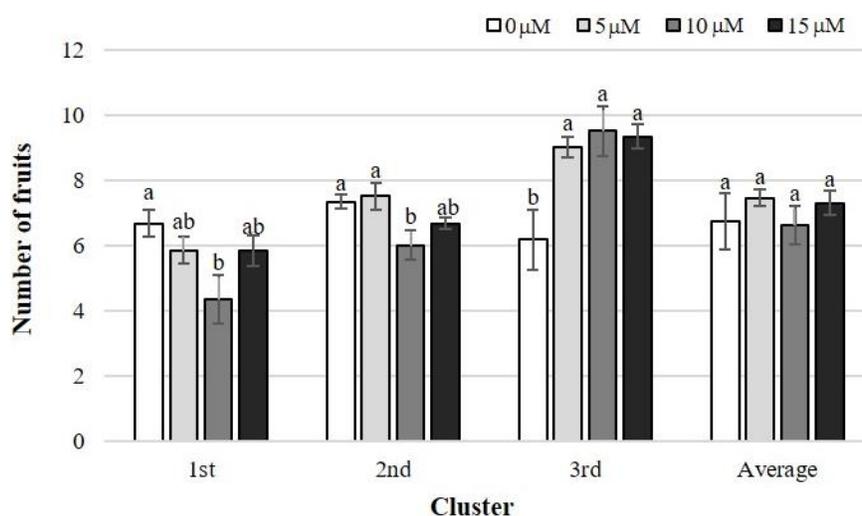


Figura 2.4. Número de frutos por racimo en plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

El número de frutos incrementó significativamente con la adición de Ce en el tercer racimo; por el contrario, en los racimos 1 y 2, el tratamiento 10 μ M Ce redujo de manera considerablemente el número de frutos. El promedio de los tres racimos no muestra diferencia significativa entre tratamientos en el número de frutos (**Figura 2.4**). El número de frutos en tomate se asocia a las partes morfológicas de la planta, así, el número depende en gran medida del tipo de inflorescencias que posean los cultivares, ya sean simples o compuestas. Se espera por tanto que, racimos compuestos posean un mayor número de flores y consecuentemente un mayor número de frutos; sin embargo, esto está en función del amarre de los frutos ([Rodríguez et al., 1997](#); [Ponce, 1995](#)). En esta investigación se observó que si bien el Ce incrementa el número de flores (**Cuadro 2.3**), también reduce el porcentaje de amarre de frutos; lo que se tradujo en no tener diferencia entre tratamientos en el número de frutos por racimo (**Figura 2.3**).

2.3.2.2. Peso promedio por fruto

El tamaño potencial del fruto está definido por el número de células del ovario fijado en pre-antesis, mientras que su tamaño real es consecuencia de la elongación celular durante el período de crecimiento rápido ([Ho, 1996](#)). En tomate, existe una

gran diversidad en cuanto al tamaño de fruto según la variedad o cultivar. [Atiyeh et al. \(2000\)](#) reportan un peso medio de fruto de 110 g para la variedad Rutgers el cual es un tomate tipo bola; [Kirda et al. \(2004\)](#) reportan un peso medio por fruto de 113 g para el cv. F1 Fantastic de origen israelí; [Olaniyi et al. \(2010\)](#) reportaron para las variedades DT97162A(R), DT97/215A, Tropical, Roma VF, UC82B, pesos promedio de fruto de 80, 50, 70, 67 y 90 g, respectivamente. Por otra parte, [Basavarajeshwar et al. \(2008\)](#) registraron para la variedad L-15 (Megha) de tomate bola evaluados en dos temporadas un peso medio por fruto de 43 y 40 g; [Ortega-Martínez et al. \(2010\)](#) mencionan un peso medio por fruto de 107.8 g para la variedad SUN 7705 que es un tomate tipo Saladette; [Logendra et al. \(2001\)](#) reportan pesos en promedio de 216,172 y149 en g por frutos correspondientes a los racimos 1 a 3 para el cv. Laura; [Afsana et al. \(2017\)](#) muestran valores de 62.7 g en promedio para el cv. BARI 15 de tomate. Para el cv. Vengador aquí estudiado, se reportaron pesos medios de fruto en el primero, segundo y tercer racimo de 88.7, 106 y 98.5 g, respectivamente (**Figura 2.5**).

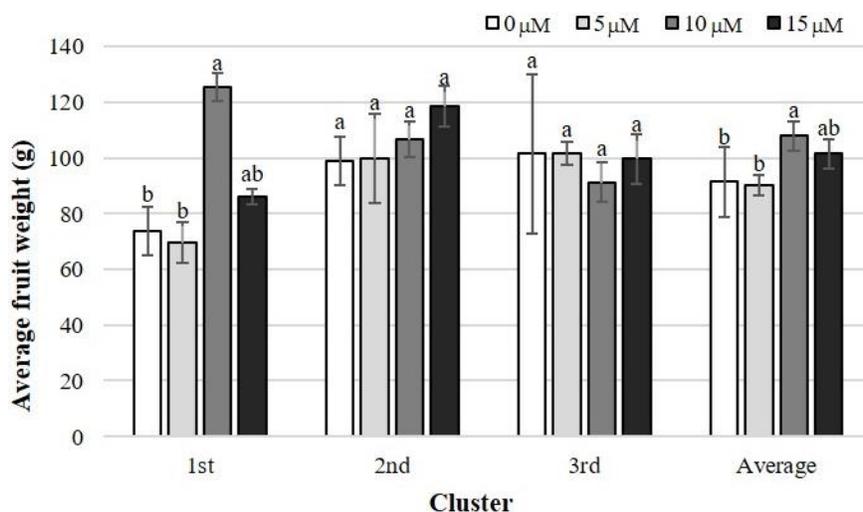


Figura 2.5. Peso promedio de un fruto en plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

El peso medio de frutos solo fue influenciado por los tratamientos evaluados, en el racimo 1 y en el promedio de los tres racimos cosechados como se puede observar en la **Figura 2.6**. En el primer racimo, la adición de 10 μM Ce incrementó en 70% el peso medio de fruto, respecto al testigo; asimismo al analizar los datos medios de tres racimos, se observan incrementos de 18% en el peso medio de fruto individual, respecto al testigo, en plantas tratadas con 10 μM Ce. Se sabe que algunos elementos tierras raras pueden afectar el crecimiento vegetal de diferentes formas, incluyendo el incremento de la sensibilidad de las células a la presencia de reguladores del crecimiento vegetal (Wang *et al.*, 2014). Las auxinas tienen un efecto importante y desencadenan el llenado de frutos en el cultivo de tomate al activar la división celular en el pericarpio. Estas fitohormonas probablemente se acumulan en las cadenas vasculares del ovario y en el óvulo seis días antes de la antesis y finalmente se localiza en las superficies interna y externa de la pared del ovario en la antesis (Pattison y Catala, 2012). Los factores de respuesta a la auxina (ARF, por sus siglas en inglés) son una familia de genes que controla específicamente diversas respuestas dependientes de estas fitohormonas, incluyendo el inicio de formación de frutos y su llenado. En tomate la proteína SIARF7 es un factor de respuesta a ARF7, cuya activación provoca una respuesta constitutiva a auxinas, y controla la formación de frutos partenocárpico (sin semillas), lo que indica que la inactivación de SIARF7 es importante para en la etapa de formación de frutos (de Jong *et al.*, 2011; Arizumii *et al.*, 2013). Aunque las evidencias mostradas en el presente estudio permiten postular que el Ce posiblemente tiene un efecto en la síntesis de auxinas, dicha hipótesis tendrá que ser comprobada a través de análisis de concentraciones de las diferentes fitohormonas en tejido vegetal, así como la regulación de genes involucrados en este proceso en plantas tratadas con Ce.

2.3.2.3. Rendimiento en peso por racimo y acumulado

Los valores de rendimiento por racimo se vieron afectados positivamente en el tercer racimo y en el promedio de rendimiento de los tres racimos. En el tercer racimo el tratamiento con 5, 10 y 15 μM Ce incrementó el rendimiento en 46.2, 40.2

y 48.3%, respectivamente, en comparación con el testigo. Asimismo, en el rendimiento promedio por racimo fue aumentado en 22% con la dosis de Ce de 15 μM , respecto al testigo (**Figura 2.6**). Estos resultados coinciden por los reportados por [Wang et al. \(2012\)](#); quienes indican incrementos significativos en el rendimiento de tomate cuando las plantas se trataron con 10 mg de nanopartículas de $\text{CeO}_2 \text{ L}^{-1}$. En col china también se registraron incrementos significativos en el rendimiento, tanto en peso fresco como seco, en el ciclo de primavera (25.33 y 29.03%, respectivamente) y en el ciclo de otoño (50.02 y 59.85%, respectivamente); lo anterior cuando las plantas fueron tratadas vía foliar con 100 mg $\text{CeCl}_3 \text{ L}^{-1}$ ([Ma et al., 2014](#)).

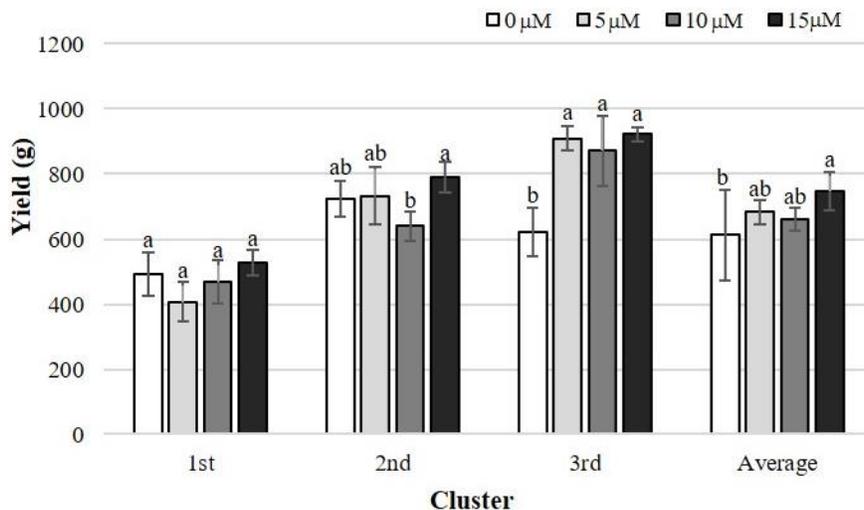


Figura 2.6. Rendimiento expresado en g por racimo en plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

En el **Cuadro 2.4** se observa el rendimiento acumulado de los tres racimos cosechados; se observa también el efecto positivo de la adición de Ce a la solución nutritiva; particularmente con la concentración 15 μM Ce aumentó el rendimiento en 21.9%, respecto al testigo. Si bien los rendimientos obtenidos en los tratamientos 5

y 10 μM Ce, no son diferentes estadísticamente al testigo, los incrementos cuantificados son del orden 11.5 y 7.8%, respectivamente.

Cuadro 2.4. Rendimiento total de los racimos 1 a 3 de plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva.

Ce, μM	Rendimiento (racimos 1, 2 y 3) (g planta ⁻¹)
0	1837.27 \pm 122.27 b
5	2048.67 \pm 140.02 ab
10	1979.97 \pm 67.58 ab
15	2240.54 \pm 171.42 a

Medias \pm DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

2.3.3. Variables de calidad en fruto

2.3.3.1. Diámetro polar y ecuatorial del fruto

Los resultados del análisis del diámetro polar y ecuatorial de fruto en tres racimos de tomate evaluados, no se observan diferencias estadísticas entre tratamientos como se observa en la **Figura 2.7**. Sin embargo, al obtener los valores promedio del diámetro ecuatorial es evidente que el tratamiento con 10 μM Ce incrementó significativamente esta variable en comparación con el testigo; éste de una magnitud de 6.3%. [Wang et al. \(2012\)](#), evaluaron el efecto en el tamaño de fruto, del tratamiento con nanopartículas de Ce, dos veces por semana, en concentraciones de 0.1, 1 y 10 mg L^{-1} a plantas de tomate, y observaron que si bien las dosis 1 y 10 mg L^{-1} muestran tendencia ascendente respecto al testigo, las diferencias no fueron significativas. Asimismo, [Barrios et al. \(2016\)](#) al evaluar distintas fuentes de Ce (nanopartículas de CeO_2 , nanopartículas de CeO_2 recubiertas con ácido cítrico, CeO_2 a granel, acetato de cerio y ácido cítrico como testigo negativo), en dosis de 62.5, 125, 250 y 500 mg kg^{-1}), concluyeron que solo

el acetato de cerio tuvo efectos significativos tanto en el diámetro ecuatorial como polar de fruto en tomate. La dosis más alta evaluada de acetato de Ce (500 mg kg^{-1}) redujo significativamente el tamaño de fruto, respecto al testigo; asimismo, si bien los frutos de plantas tratadas con las dosis 62.5 y 125 mg kg^{-1} tienen mayor tamaño que el testigo, la diferencia no es significativa.

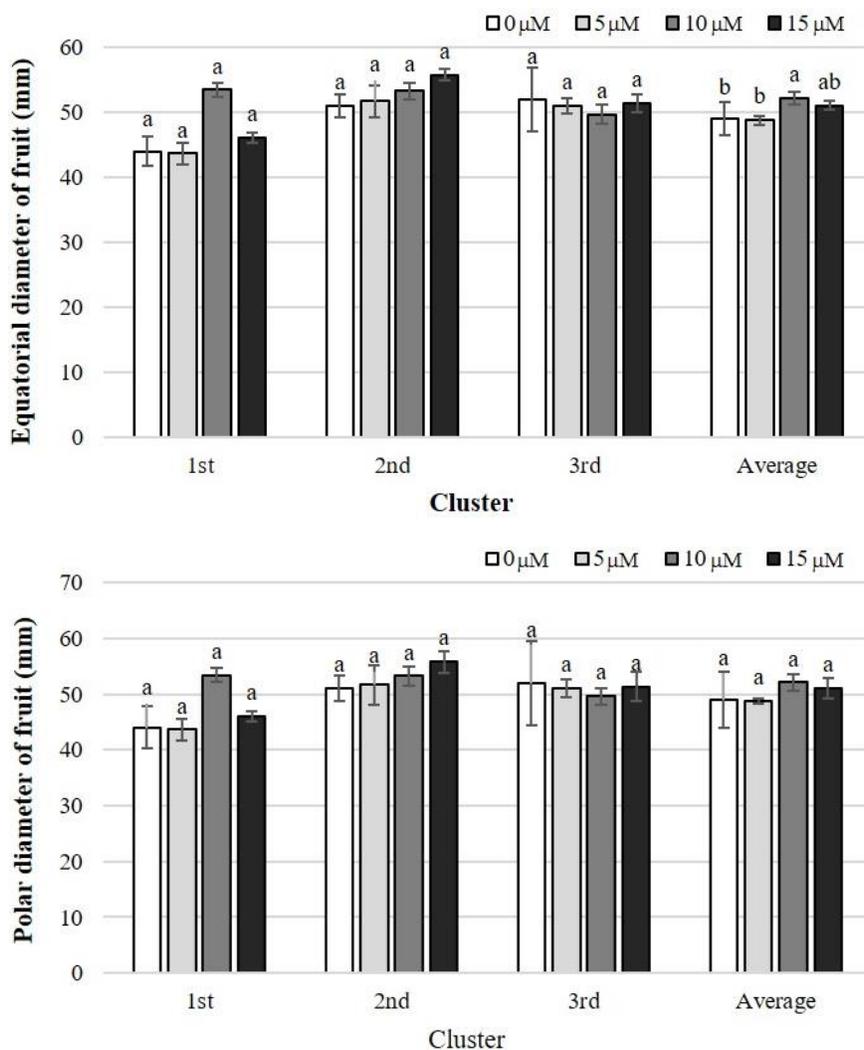


Figura 2.7. Diámetros polar y ecuatorial de frutos de tres racimos de tomate provenientes de plantas tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva. Medias \pm DE con letras distintas en cada racimo y figura, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

2.3.3.2. Parámetros de color

El color es uno de los atributos más importantes y complejos de la calidad del fruto de tomate; éste se encuentra relacionado con la presencia en gran medida, de pigmentos carotenoides diversos y la apariencia está condicionada por los tipos y las concentraciones de pigmentos específicos que a su vez está determinado por la constitución genética y el ambiente ([Kabelka et al., 2004](#)). En este contexto, a continuación, se describen los resultados obtenidos en los atributos de color (luminosidad, ángulo hue y croma) de frutos de tres racimos de tomate cuando son sometidos a diferentes concentraciones de Ce.

2.3.3.2.1. Luminosidad. Los resultados de luminosidad de fruto fueron diferentes entre racimos y por supuesto también dependientes del momento de evaluación como se observa en la **Figura 2.8**.

Al momento de la cosecha, el tratamiento 5 μM Ce incrementó significativamente la luminosidad de frutos del segundo racimo, respecto al tratamiento 10 μM Ce, con valores superiores en 13%. Por otra parte, después de 8 d del corte de frutos, destacan los resultados obtenidos en el tercer racimo, donde la concentración 15 μM Ce incrementó significativamente la luminosidad del fruto respecto al testigo y al tratamiento con 10 μM Ce (**Figura 2.8**).

Es interesante analizar las tendencias en el tiempo en los diferentes tratamientos. Los frutos del tratamiento testigo de los racimos 1 y 3 redujeron la luminosidad del fruto en 9 y 2.7%, respectivamente. El tratamiento con 5 μM Ce, a pesar de mostrar valores numéricos más altos al corte, ocasionó la reducción de la luminosidad del fruto después de 8 d del corte en 3.1, 4.8 y 1.8% en los racimos 1, 2 y 3. El tratamiento con 10 μM Ce redujo en el tiempo solo la luminosidad de frutos del racimo uno en 6.3%; por el contrario, los frutos de racimos 2 y 3 la incrementaron en 10.4 y 7.5%, respectivamente. El tratamiento 15 μM Ce, solo mostró decremento en el tiempo en la luminosidad en frutos del segundo racimo, éste del 5.7%; por el contrario, en el primero y tercer racimo se registraron incrementos en esta variable de 5.9 y 2.7%, respectivamente (**Figura 2.8**). Estas tendencias son importantes dado que [Herrera-Hernández et al. \(2013\)](#) han mostrado que la luminosidad del fruto

en tomate se relaciona de manera positiva con la concentración de fenoles totales. Asimismo, el contenido de fenoles en el fruto de tomate se relaciona de manera directa con la capacidad antioxidante y con la vida de anaquel ([Martínez-Valverde et al., 2002](#)).

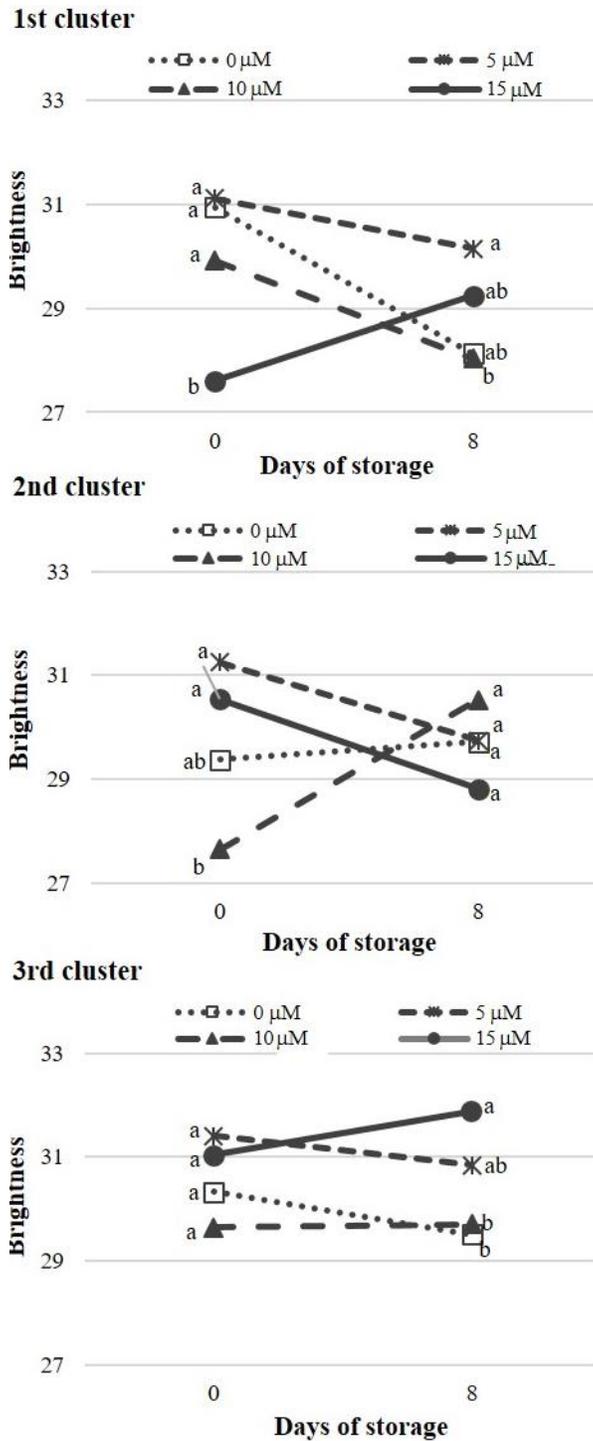


Figura 2.8. Luminosidad en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha 0 d y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).

2.3.3.2.2. Hue. En la cosecha los valores del ángulo hue fueron superiores en frutos provenientes del racimo 1 del tratamiento testigo que el resto de los tratamientos. Esta respuesta se replicó en el racimo 3, donde el testigo superó significativamente a los valores obtenidos en esta variable en los tratamientos 5 y 10 μM Ce. Por otra parte, después de 8 d de la cosecha, los tratamientos solo tuvieron efecto significativo en el valor de hue en frutos del segundo racimo; donde, se observó que el testigo tiene el valor más alto y solo supera desde el punto de vista estadístico a los resultados obtenidos con los tratamientos con 5 y 10 μM Ce (**Figura 2.9**).

[Radzevičius et al. \(2008\)](#) reportan que, durante todo el proceso de maduración de frutos, el ángulo hue tiene una tendencia a reducirse. Al comparar los resultados de las dos evaluaciones realizadas, destaca que el testigo tuvo decrementos en el valor de hue (frutos más rojos y oscuros) de casi 21% en frutos del racimo 1; mientras que tuvo un decremento de 19.9% en frutos del racimo 3; solo en el racimo 2 se tuvo un incremento en el valor de hue de 15.8% en el tiempo. Por otra parte; los frutos del segundo y tercer racimo con la dosis 10 μM Ce incrementaron el valor de hue en el tiempo en 6.8 y 17%, respectivamente; y lo redujeron en 5.9% en frutos de primer racimo. Es de destacarse que la menor variación en el valor de hue en el tiempo la tuvieron los frutos de plantas tratadas con 15 μM Ce; donde en el racimo 1 se registró un decremento de 2%; y en los racimos 2 y 3 se observaron aumentos de 7.1 y 2.7%, respectivamente. El decremento tanto en el valor del ángulo hue como en la luminosidad del fruto durante el almacenamiento está relacionado con la síntesis de licopeno, un pigmento que contribuye al color rojo de los tomates ([Mahfoudhi et al., 2016](#)). En este sentido, el Ce retrasa la evolución del color en el periodo poscosecha en frutos de los racimos 2 y 3, cuando es suministrado a las concentraciones de 10 y 15 μM ; mientras que la dosis 5 μM Ce también ocasionó este efecto en frutos de los racimos 1 y 3; lo cual se traduce en mayor vida de anaquel.

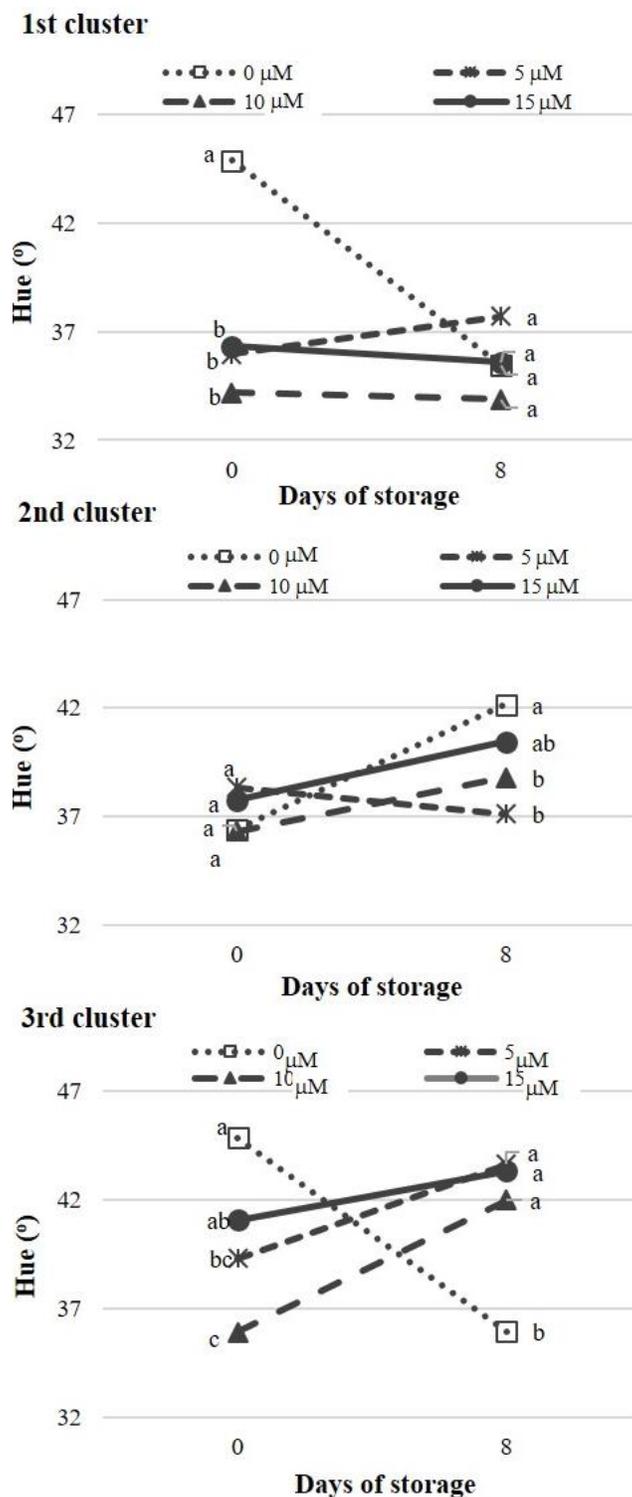


Figura 2.9. Ángulo de tono en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha 0 d y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).

2.3.3.2.3. Croma. El índice de saturación del color o croma toma valores que oscilan de 0 a 60, donde valores cercanos a 0 indican colores poco saturados: mientras que valores cercanos a 60 indican máxima saturación (Konica Minolta, 2014); es decir el valor del croma es proporcional a la intensidad del color. Destaca en la **Figura 2.10**, que frutos de los racimos 1 y 3 del tratamiento testigo mostraron los menores valor de croma en las dos fechas de evaluación (en el corte y después de 8 días de almacenamiento), que el resto de los tratamientos.

El croma evaluado al momento de la cosecha, mostró diferencias estadísticas entre tratamientos en frutos de los racimos 1 y 3. En éstos se observó un incremento del 10.6 y 6.4%, respectivamente, en frutos de plantas tratadas con 5 μM Ce en comparación con el testigo; lo que indica frutos de color más intenso. Por otra parte, después de 8 d de almacenamiento a temperatura ambiente, solo se tuvo efecto de los tratamientos en frutos del tercer racimo, donde el tratamiento con 15 μM Ce ocasionó frutos con valor más alto de croma que los del testigo en 8% (**Figura 2.10**).

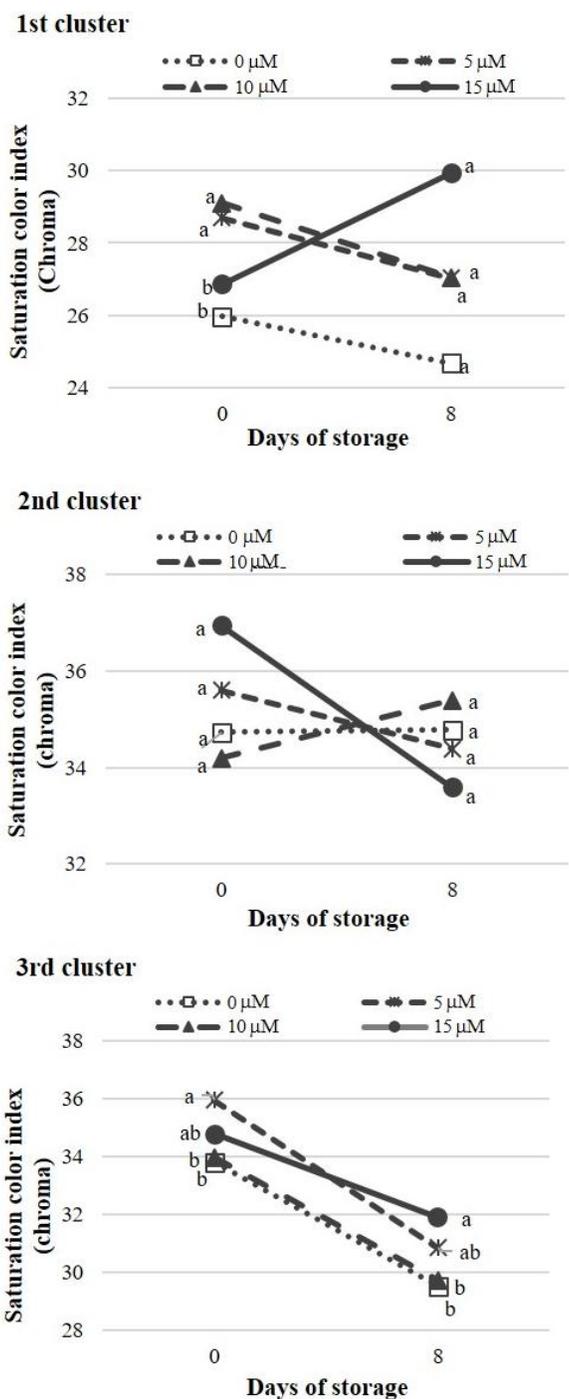


Figura 2.10. Índice de saturación de color (Croma) en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha 0 d y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).

2.3.3.3. Licopeno

El licopeno es un carotenoide no provitamina A que es responsable del color rojo de los tomates ([Story et al., 2010](#)). El licopeno es sintetizado en plantas y microorganismos, dentro de sus funciones principales en plantas están la absorción de luz durante la fotosíntesis lo que tiene un efecto protector de la planta contra la fotosensibilización; la ingesta de licopeno por parte del ser humano tiene efectos antioxidantes lo que trae efectos positivos en la salud. Los valores en tomate fresco oscilan desde 0.72 hasta 20 mg 100 g⁻¹ de peso fresco ([Waliszewski y Blasco, 2010](#)). Previamente se indicó que, con el almacenamiento de los frutos, se incrementa la síntesis de licopeno ([Mahfoudhi et al., 2016](#)).

En este estudio, la estimación de la concentración de licopeno en frutos recién cortados solo tuvo diferencias estadísticas en aquellos provenientes de los racimos 1 y 3. En el racimo 1, el tratamiento con 5, 10 y 15 μM Ce incrementó la concentración de licopeno en 32.9, 40.7, 30.6%, respectivamente, en comparación con el testigo. En el tercer racimo, el tratamiento con 10 μM Ce aumentó la concentración de cerio en 31.5%, respecto al testigo (**Figura 2.11**).

Por otro lado, después de 8 d del corte de frutos, solo se observaron diferencias estadísticas en licopeno en frutos del segundo y tercer racimos. El tratamiento con 5 μM Ce tuvo un aumento en 17.3% en licopeno respecto al testigo. Por el contrario, en el tercer racimo, después del periodo de almacenamiento la concentración de licopeno frutos del tratamiento testigo superó en 22.1, 17.9 y 20.7% las concentraciones de licopeno estimadas en frutos de plantas tratadas con 5, 10 y 15 μM Ce (**Figura 2.11**).

Los resultados aquí obtenidos son contrarios a los descritos por [Barrios et al. \(2017\)](#), quienes observaron efectos negativos de Ce en la concentración de licopeno en frutos completamente maduros, dependientes de la fuente y concentración de Ce. La adición de nanopartículas de CeO₂ recubiertas con ácido cítrico en dosis de 500 mg kg⁻¹ redujeron la concentración de licopeno en frutos, respecto al testigo; mientras que CeO₂ a granel en dosis de 62.5, 125, 250 y 500 mg kg⁻¹, tuvieron efecto negativo en la concentración de licopeno, donde los mayores decrementos

respecto al testigo fueron de 92% en la dosis 62.5 mg kg^{-1} y de 72% con las dosis 62.5 mg kg^{-1} .

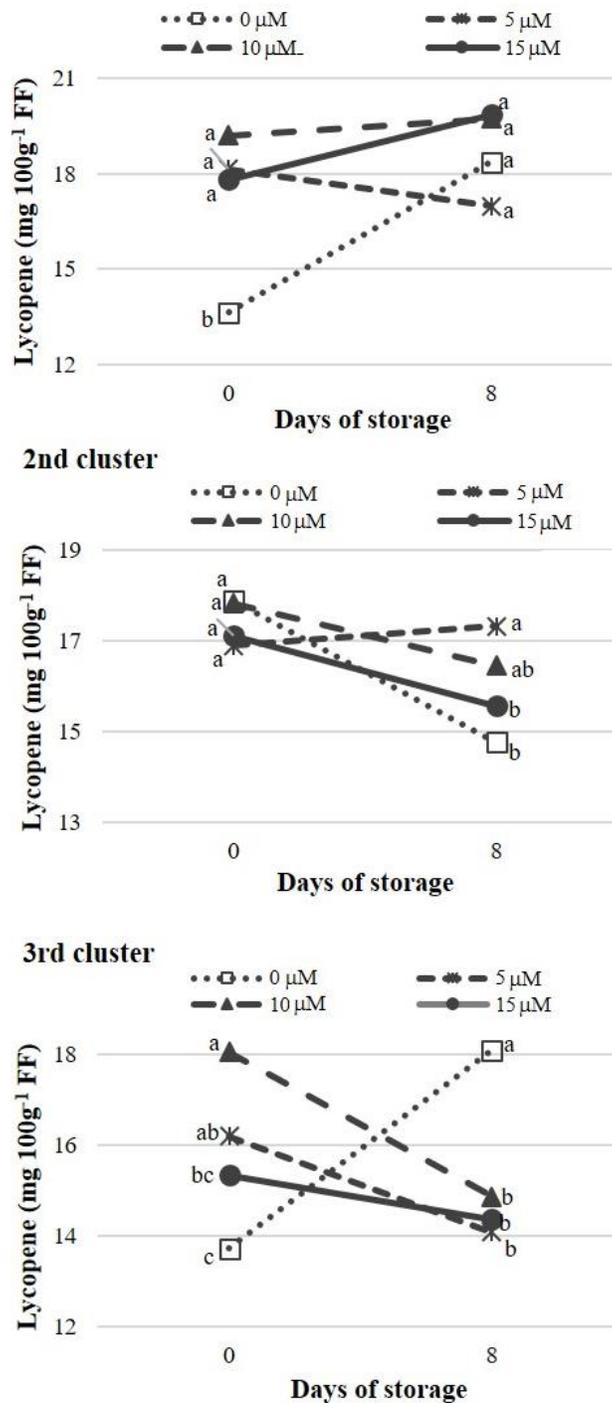


Figura 2.11. Concentración de licopeno en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha 0 d y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).

Los resultados aquí obtenidos son de suma importancia, dado que el Ce retrasa la evolución del color como se observa en los resultados del ángulo hue (**Figura 2.9**), sin afectar de manera negativa la síntesis de licopeno si no por el contrario promoviéndola (**Figura 2.11**).

2.3.3.4. Conductividad eléctrica y pH

La conductividad eléctrica es una propiedad que mide la capacidad de un material para conducir corriente eléctrica. En alimentos, la conductividad eléctrica es una función de las características del producto; es decir, es un indicador de la composición, concentraciones de azúcares, iones, pH, entre otros ([Lamsal y Jindal, 2014](#)).

La conductividad eléctrica del jugo de tomate fue significativamente mayor en frutos provenientes del segundo y tercer racimos de plantas tratadas con Ce en comparación con el testigo, como se observa en la **Figura 2.12**. En frutos del segundo racimo el aumento ocasionado en la conductividad eléctrica por los tratamientos con Ce fue de 10.8 y 11.7% en frutos recién cortados y en frutos almacenados durante 8 d, respectivamente. En frutos del tercer racimo, los incrementos en la conductividad eléctrica fueron de 13.5 y 9.4% en frutos recién cortados y en frutos con 8 d de almacenamiento, respectivamente.

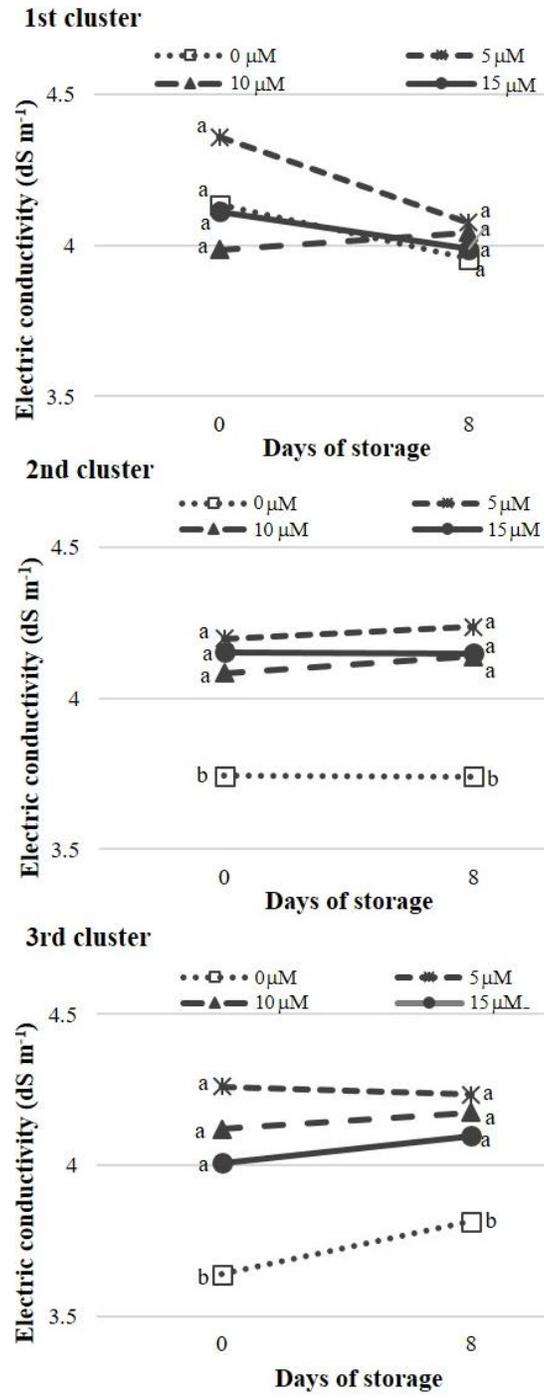


Figura 2.12. Conductividad eléctrica en jugo de frutos de tres racimos de tomate en la cosecha 0 d y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).

El pH es un atributo de calidad del fruto de tomate, los valores de éste pueden oscilar entre 3.8 a 4.8 (Méndez *et al.*, 2011; Navarro-López *et al.*, 2012). Este estudio se observa que el valor del pH en el jugo de frutos al momento del corte, es significativamente más bajo (frutos más ácidos) cuando las plantas se trataron con 5 μM Ce en el primer racimo, con 15 μM Ce en el segundo racimo y con todas las dosis evaluadas de Ce en el tercer racimo. Después de 8 d de almacenamiento, solo en frutos del tercer racimo se registraron diferencias estadísticas en el valor de pH del jugo de los frutos; dichas diferencias fueron entre las dosis de Ce suministradas. Mayor valor de pH se tuvo con la dosis 15 μM Ce; respecto a los registrados con los niveles 5 y 10 μM Ce (**Figura 2.13**).

El tratamiento con Ce ocasionó la producción de frutos más ácidos al momento del corte (pH medios de 3.93, 3.71 y 3.72 en los racimos 1, 2 y 3, respectivamente); de acuerdo a Tigist *et al.* (2013) valores de pH bajos en frutos se relacionan de manera positiva con una menor tasa de respiración y por tanto con el mantenimiento de una mejor calidad por más tiempo. Por otra parte, el pH es un importante parámetro de calidad y procesamiento del tomate; en particular para la industria se prefieren frutos ácidos dado que necesitan menos tiempos de procesamiento con los cuales se afecta en menor medida la calidad del producto (Takhur *et al.*, 1996).

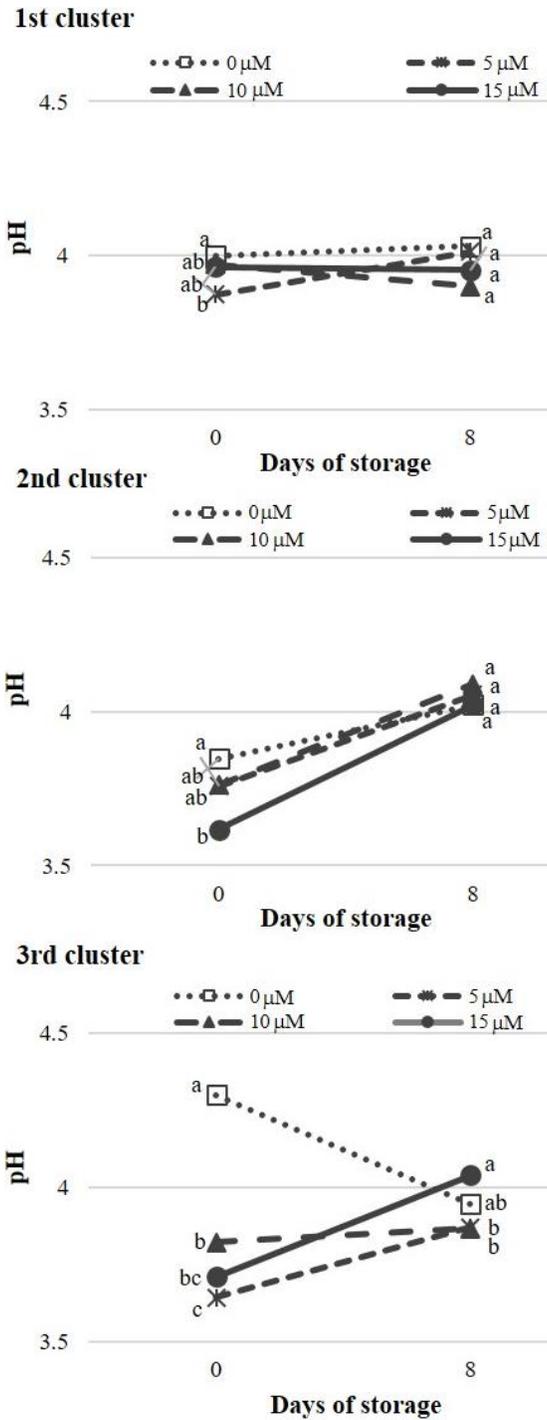


Figura 2.13. Valor de pH en el jugo de frutos de tres racimos de tomate en la cosecha 0 d y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).

2.3.3.5. Porcentaje de pérdida de peso

El porcentaje de pérdida de peso en los tres racimos evaluados y en el promedio de éstos se presenta en la **Figura 2.14**. El porcentaje de pérdida de peso aumenta conforme avanza el tiempo de almacenamiento de los frutos. De acuerdo con [Tilahun *et al.* \(2017\)](#), para un periodo de almacenamiento de 20 días la pérdida de peso del fruto puede alcanzar entre el 2 y 3%, cuando la temperatura es de 12 °C y la humedad relativa del 85%. Por otra parte, [Nunes \(2008\)](#) indica que el máximo porcentaje aceptable de pérdida de peso es entre el 6 y 7%.

En el primer racimo solo existieron diferencias en la pérdida de peso entre frutos tratados con 5 y 10 mM Ce; éste último con un valor menor (7.3%); el cual es muy cercano al reportado por [Nunes \(2008\)](#). En el segundo racimo, la mayor pérdida de peso se tuvo en el tratamiento con 10 µM Ce, respecto al testigo. Al igual que en el racimo 1, en el tercer racimo, la menor pérdida de peso se tuvo en frutos provenientes de plantas tratadas con 10 µM Ce, lo anterior, respecto al tratamiento con 15 µM Ce que tuvo, por el contrario, el mayor valor porcentual en la pérdida de peso. En el promedio de pérdida de peso, no se observaron diferencias estadísticas significativas (**Figura 2.14**).

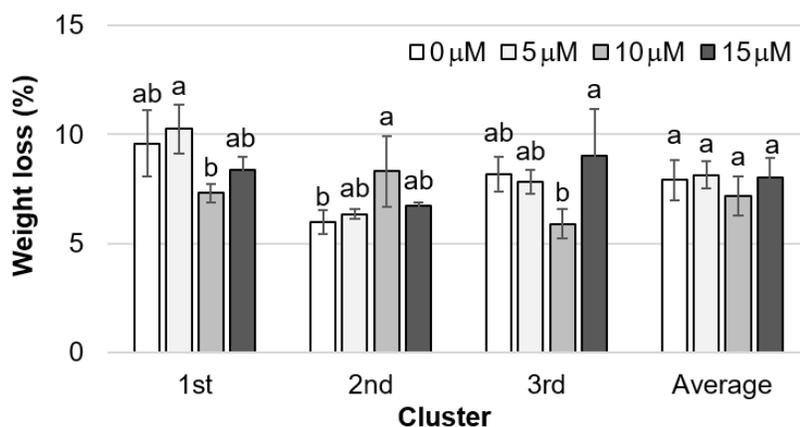


Figura 2.14. Porcentaje de pérdidas de peso obtenidas en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha 0 d y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).

2.3.3.6. Firmeza

Las propiedades texturales del fruto de tomate se correlacionan con los cambios estructurales de las pectinas, que puede atribuirse a la actividad de enzimas pectinolíticas como la pectinmetilesterasa (PME, E.C. 3.1.1.11) y la poligalacturonasa (PG, E.C. 3.2.1.15) (Barrett *et al.*, 1998). La PME es una enzima hidrolítica ligada a la pared celular y es liberada en el momento de extracción del jugo (Polydera *et al.*, 2004). Por otra parte, la PG es responsable de la despolimerización de la pectina, hidrolizando los enlaces glucosídicos D-1.4 de las cadenas de ácido poligalacturónico (Crelier *et al.*, 2001).

Por otro lado, el etileno, hormona formada a partir de la metionina vía S-adenosil-L-metionina y el aminoácido cíclico no proteico el ácido 1-aminociclopronano-1-carboxílico (ACC), cuya síntesis va en aumento conforme avanza el periodo poscosecha y permite la madurez del fruto de tomate (Alexander y Grierson, 2002); se relaciona de manera indirecta con la firmeza de fruto (Borsani *et al.*, 2009).

La firmeza de frutos de tomate fue tomada en dos momentos, al corte y después de ocho días de almacenamiento, los resultados obtenidos se presentan en la **Figura 2.15**. Se observa que, de manera independiente a los tratamientos, en frutos de los tres racimos evaluados, la firmeza decrece durante el periodo de almacenamiento; esta respuesta en el tiempo era esperada dado que de acuerdo con Tucker y Grierson (1982) la PG no es detectable en tomates verdes; su actividad inicia con el proceso de maduración del fruto; en tomates maduros es la proteína principal unida a la pared celular.

La firmeza de los frutos del racimo 1, tanto al corte como después del periodo de almacenamiento no fue diferente entre tratamientos.

En el racimo 2 se observa que la dosis de 10 μM Ce incrementó en 36.6% la firmeza de frutos recién cortados, respecto al tratamiento con 15 μM ; sin embargo, ambas dosis (10 y 15 μM Ce) no son estadísticamente diferentes al testigo. Después de 8 d del corte, tomates de plantas tratadas con 5 μM Ce mostraron mayor firmeza que el testigo en 37.2%.

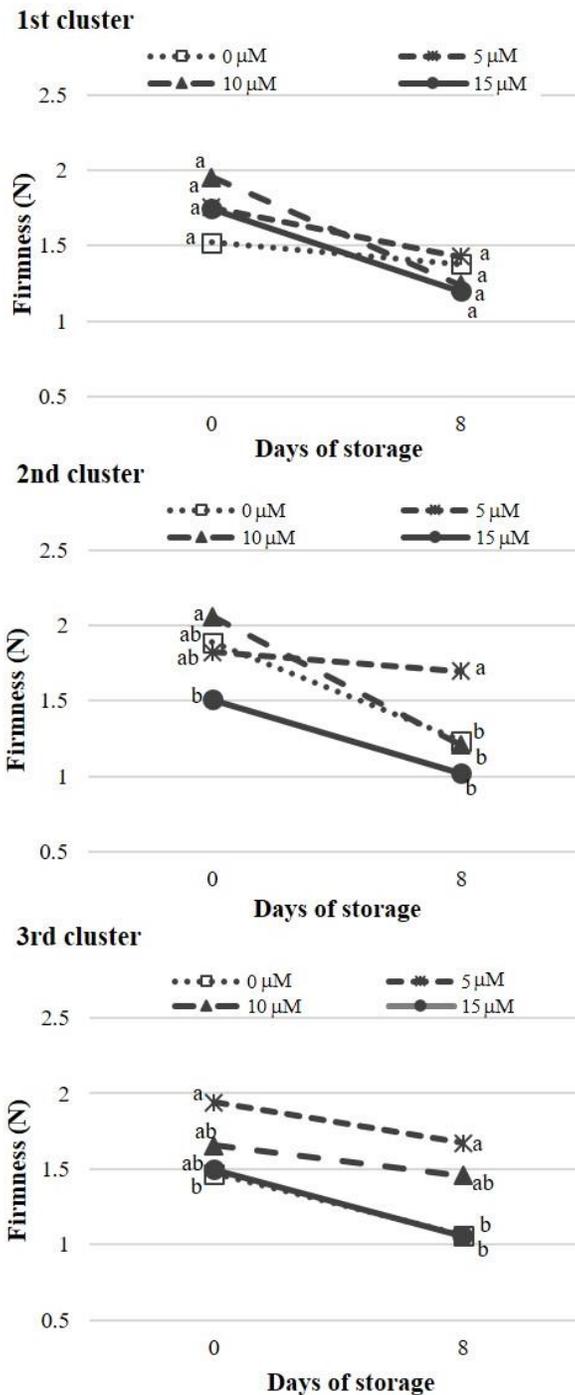


Figura 2.15. Firmeza expresada en Newton (N) obtenida en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha 0 d y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).

En el caso de frutos del racimo 3, la firmeza de los frutos recién cortados y después de 8 d de la cosecha de plantas tratadas con 5 μM Ce, fue incrementada en 32.3 y 57.3%, respectivamente, en ambos casos en comparación con el testigo.

Respecto a los valores de firmeza en tomate, el mínimo aceptable en frutos comercializables es de 1.45 N para aparador, y de 1.28 N para consumo doméstico (Batu, 2004). En el primer racimo, solo las dosis 10 y 15 μM Ce después de 8 d de almacenamiento tuvieron firmeza menor a 1.28 N. En el segundo racimo, los frutos de los tratamientos 0, 10 y 15 μM Ce después de 8 d de almacenamiento presentaron valores de firmeza menores a 1.28 N. Después de 8 d de almacenamiento, los frutos que presentaron firmezas menores a 1.28 N son los provenientes de plantas tratadas con 0 y 15 μM Ce (**Figura 2.15**).

Los resultados anteriores permiten afirmar que la dosis 5 μM Ce tiene efectos positivos en la firmeza de frutos (racimos 1 y 2); en particular después de la cosecha, lo cual significa incremento en la vida de anaquel. En este sentido, Zheng *et al.* (2012) reportaron que la aplicación foliar de una mezcla de elementos de las tierras raras (La, Ce, Pr, Cg, Nd y Sm) a una concentración de 2% o de Ca no tuvieron efecto en la firmeza de frutos de manzano Fuji/M.9 en el momento de la cosecha; pero, tuvo efectos significativos el inhibir el ablandamiento del fruto durante el periodo de almacenamiento. Estos autores concluyen que los REEs reducen la tasa respiratoria e inhiben la síntesis de etileno durante el periodo de almacenamiento. Por otro lado, EL-Kader *et al.* (2018) reportaron incrementos modestos en la firmeza del fruto, los cuales no fueron significativos, cuando se realizó la inmersión de los racimos de uva en dos momentos (cuajado de fruto y al inicio de la maduración) de racimos de uva Superior (seedless sugraone) en soluciones de Ce (5 a 20 mg L^{-1}). Los mecanismos que subyacen tras estos efectos del Ce no han sido elucidados. Además del probable involucramiento del Ce en la síntesis de etileno que se asocia con el ablandamiento de frutos en el periodo de poscosecha como se indicó previamente; deben en futuros estudios considerarse los efectos que el Ce puede tener de manera directa en la PG, así como indirecta al probablemente incrementar la absorción y traslocación de Ca a frutos, elemento que es un inhibidor de la actividad de la PG al fungir en su forma iónica, como estabilizador de los polímeros

de ácido poligalacturónico (Giovannoni *et al.*, 2010). Asimismo, debe tomarse en cuenta que ha sido demostrado en tomate, que el efecto inhibitorio del Ca en la PG en frutos es eliminado en presencia de etileno (Chunbin *et al.*, 1990). Por otra parte, la estructura de los elementos de las tierras raras es muy similar a la del Ca²⁺; por lo que puede reemplazarlo y competir con él por sitios de unión, lo que puede afectar el funcionamiento de algunas enzimas en la membrana celular, promover la absorción, utilización y transformación de nutrimentos (Carpenter *et al.*, 2015).

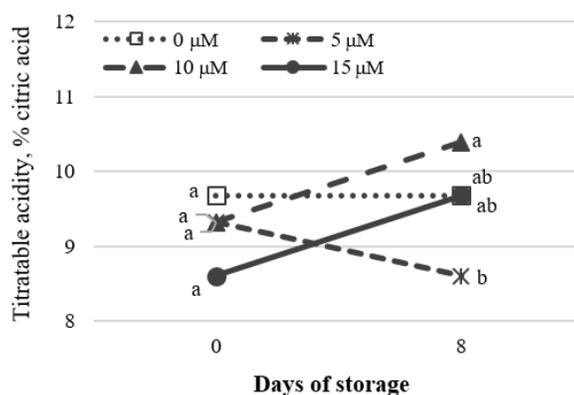
2.3.3.7. Acidez titulable

La acidez titulable de frutos estima los ácidos orgánicos presentes que se encuentran libres. En tomate, el ácido orgánico más abundante es el cítrico, cuya concentración puede variar dependiendo del genotipo, de las condiciones de cultivo y cosecha, así como manejo poscosecha. Los valores de acidez titulable del jugo de tomate pueden variar de 0.30 a 0.85 mg 100 mL⁻¹ en base fresca (Méndez *et al.*, 2011; Polat *et al.*, 2010; Tilahun *et al.*, 2017). De acuerdo con Dávila-Aviña *et al.* (2011), la acidez de los frutos tiende a disminuir conforme avanza la madurez, lo cual es acompañado con un aumento en el contenido de azúcares (Raffo *et al.*, 2002). Esta tendencia a disminuir solo se observó en frutos del primer y segundo racimos de plantas tratadas con 5 µM Ce y en frutos del tercer racimo de plantas que recibieron el tratamiento 10 µM Ce (**Figura 2.16**). Estos resultados muestran tendencias similares a los de Zheng *et al.* (2012), quienes si bien no observaron efectos significativos de la aplicación foliar de elementos de las tierras raras en la acidez titulable del fruto de manzana Fuji/M9; sí mostraron un efecto en retardar la reducción del valor de la acidez titulable durante el almacenamiento. En este sentido, el efecto del Ce y otros elementos de las tierras raras es positivo, dado que la alta pérdida de la acidez titulable en tomate está relacionada con una mayor tasa de respiración y de maduración, donde los ácidos orgánicos podrían ser usados como sustratos en el proceso respiratorio (Tigist *et al.*, 2015).

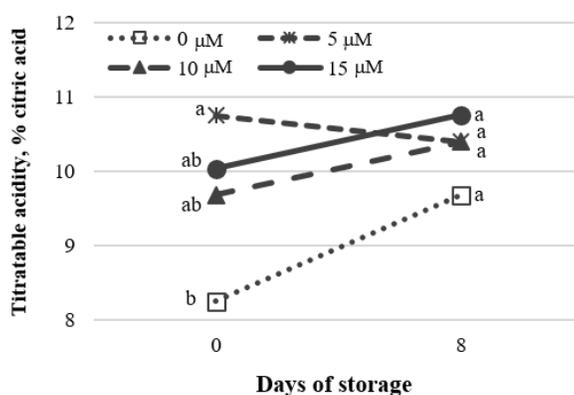
Por otra parte, al momento del corte se observó que los frutos del tratamiento testigo de los racimos 2 y 3, tuvieron menor acidez titulable que frutos de plantas tratadas

con 5 y 15 μM Ce, respectivamente. Asimismo, los valores de ácido cítrico en frutos del segundo racimo después de 8 d no son diferentes entre tratamientos, se observa mayor porcentaje de ácido cítrico en los tratamientos con Ce. Asimismo, en el tercer racimo, después del periodo de almacenamiento, los frutos del tratamiento 15 μM Ce tuvieron mayor concentración de ácido cítrico que frutos del testigo (**Figura 2.16**). Estos resultados se relacionan de manera inversa con los valores de pH obtenidos (**Figura 2.13**); es decir, a mayor concentración de ácido cítrico menor valor de pH; es decir se tienen frutos más ácidos. Por el contrario, [EL-Kader et al. \(2018\)](#) no encontraron diferencias significativas en la acidez total de frutos de uva, tratados mediante inmersión en dos momentos (cuajado de fruto y al inicio de la maduración) de racimos de uva Superior (seedless sugraone) en soluciones con Ce en concentraciones de 5, 10 y 20 mg L^{-1} . Asimismo, [Ma et al. \(2014\)](#) reportaron en col china cultivada en primavera, efectos negativos del suministro foliar de CeCl_4 a una dosis de 100 mg L^{-1} durante 8 días, en la acidez titulable, misma que fue reducida en 11.5% en comparación con el testigo.

1st cluster



2nd cluster



3rd cluster

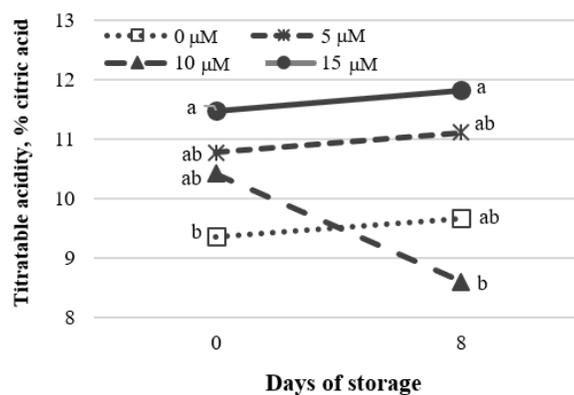


Figura 2.16. Acidez titulable expresada en porcentaje de ácido cítrico obtenidos en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha 0 d y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).

2.3.3.8. Sólidos Solubles Totales (SST)

Los constituyentes principales de los sólidos solubles totales son los azúcares solubles y los ácidos orgánicos; éstos y su interacción son de suma importancia para la calidad en tomate ya que determinan la dulzura, acidez e intensidad del sabor. En cultivares de tomate típicos, la concentración sólidos solubles totales se incrementa con el color y la madurez; sin embargo, existen algunos genotipos de tomate en los cuales se ha reportado incremento en esta variable a medida que el fruto madura (Tigist *et al.*, 2013). Por otra parte, los sólidos en fruto son un factor también de calidad para el tomate procesado en la industria dado que tiene influencia en el rendimiento final y la consistencia del producto terminado (Thakur *et al.*, 1996).

En este estudio, de manera general (racimos 1 y 3), tanto en el momento del corte como después del almacenamiento, el tratamiento 15 μM Ce y el testigo tuvieron los mayores valores de sólidos solubles totales (**Figura 2.17**).

En frutos recién cortados de los racimos 2 y 3 se observaron diferencias estadísticas entre el tratamiento testigo y el tratamiento 10 μM Ce. En ambos casos, fue superior el testigo en 19.8 y 28.9%, respectivamente. Después de 8 d de almacenamiento, se observaron diferencias estadísticas entre tratamientos en los sólidos solubles totales de frutos de los tres racimos. En el primer racimo, los valores más altos se registraron en los tratamientos 15 y 0 μM Ce; en el segundo racimo, el tratamiento 5 μM Ce tuvo mayor valor de sólidos solubles totales que el tratamiento 10 μM Ce. Finalmente, en el tercer racimo, 15 μM Ce superó en esta variable al tratamiento con 5 μM Ce (**Figura 2.17**).

Al analizar los resultados en el tiempo, destaca el tratamiento 10 μM Ce, donde en el promedio de los tres racimos, se observó un incremento de 13.2% entre la cosecha y después de 8 d de almacenamiento, en los sólidos solubles totales. Por el contrario, la mayor pérdida en el tiempo en sólidos solubles totales se tuvo en el tratamiento con 5 μM Ce, con un valor menor 2.3%.

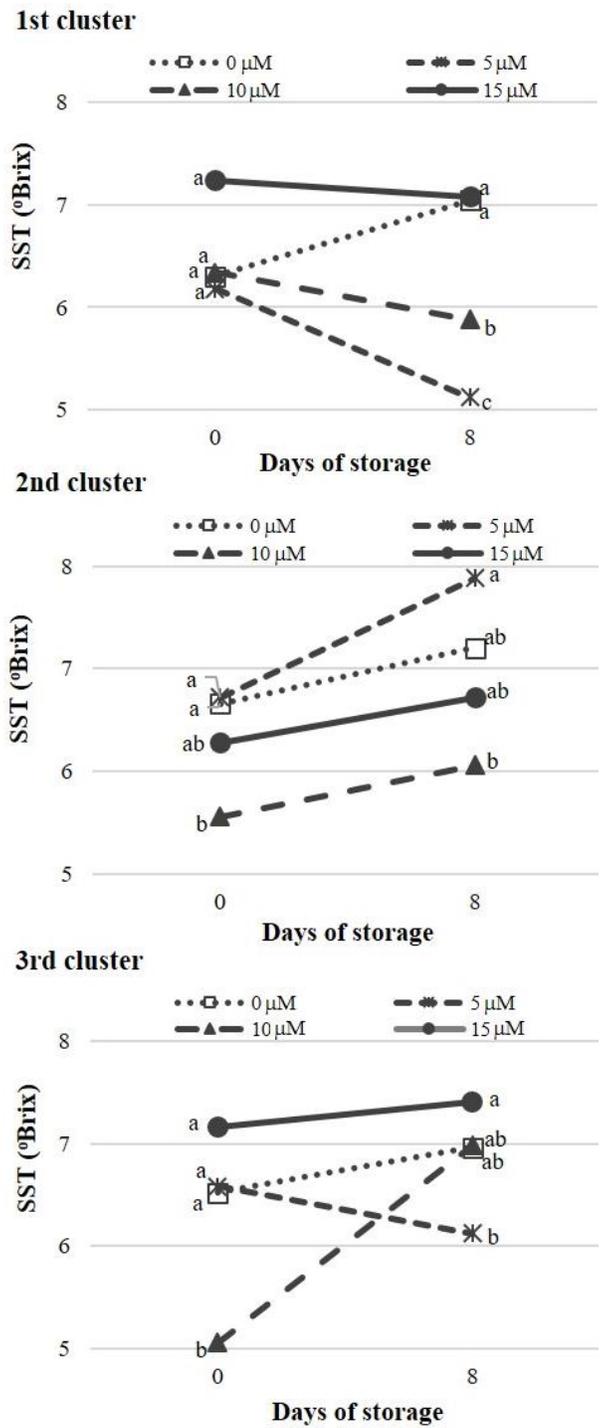


Figura 2.17. Sólidos Solubles totales expresados en grados Brix obtenidos en frutos de tres racimos de tomate en la cosecha 0 d y después de 8 d de almacenaje a temperatura ambiente, provenientes de plantas tratadas con Ce en la solución nutritiva. Medias en cada racimo y fecha de evaluación con letras distintas, indican diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$).

2.3.3.9. Concentración de vitamina C

De acuerdo con el [NIH \(2016\)](#), la vitamina C o ácido ascórbico, es un nutriente hidrosoluble que se encuentra en ciertos alimentos como cítricos y tomates ([Beecher, 1998](#)). En el cuerpo humano, la vitamina C actúa como antioxidante, al ayudar a proteger las células contra los daños causados por los radicales libres. Además, el cuerpo necesita vitamina C para producir colágeno, una proteína necesaria para la cicatrización de las heridas. La vitamina C también mejora la absorción del hierro presente en los alimentos de origen vegetal y contribuye al buen funcionamiento del sistema inmune para proteger al cuerpo contra enfermedades. En tomate, los contenidos de vitamina C oscilan entre 10 y 50 mg 100 g⁻¹ (entre 100 y 500 µg g⁻¹) de peso fresco de frutos ([Burge *et al.*, 1975](#); [Di Matteo *et al.*, 2010](#)). En este estudio, los valores de concentración de vitamina C en frutos, se encontraron de manera general dentro de este intervalo como se observa en el **Cuadro 2.5**.

De acuerdo con [Singh y Singh \(2015\)](#) y [El-Ishaq y Obirinakem \(2015\)](#), el contenido de vitamina C en tomate puede variar de acuerdo con las condiciones de temperatura y luminosidad en que se almacena, y se puede mantener por mayor tiempo cuando se reducen los procesos de respiración y transpiración. Por otra parte, la aplicación de nanopartículas de óxido de cerio no afecta variables de crecimiento en tomate ([Wang *et al.*, 2012](#)).

En este estudio, solo se registraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en frutos del tercer racimo, tanto recién cortados como después de 8 d de almacenamiento (**Cuadro 2.5**). En frutos recién cortados, el tratamiento 5 mM Ce ocasionó un incremento significativo de 28.4%, en la concentración de vitamina C, respecto al tratamiento con 15 µM Ce. Asimismo, después de 8 d de almacenamiento, el tratamiento de plantas con 10 y 15 µM Ce incrementó en 37.3 y 30.7% la concentración de vitamina C en frutos, en comparación con el testigo. Contrario a estos resultados, en col china cultivada en otoño, se observó una reducción del 18.53% en la concentración de vitamina C, cuando las plantas fueron tratadas durante 8 días con dosis de 100 mg CeCl₄ L⁻¹ vía foliar durante 8 días consecutivos, en comparación con el testigo ([Ma *et al.*, 2014](#)).

Cuadro 2.5. Concentración de vitamina C en frutos de tres racimos de plantas de tomate tratadas con distintas concentraciones de Ce en la solución nutritiva.

Vitamina C, g de ácido ascórbico 100 g de peso fresco						
Ce, μM	Racimo 1		Racimo 2		Racimo 3	
	0 d	8 d	0 d	8 d	0 d	8 d
0	49.0 ± 2.5 a	42.6 ± 3.5 a	50.7 ± 1.9 a	44.6 ± 2.5 a	44.6 ± 3.0ab	36.2 ± 2.8 c
5	50.7 ± 1.5 a	43.6 ± 1.8 a	56.5 ± 4.0 a	47.3 ± 4.9 a	50.7 ± 2.6 a	38.5 ± 2.2 bc
10	51.8 ± 3.8 a	43.3 ± 2.0 a	52.8 ± 2.4 a	43.3 ± 2.4 a	43.6 ± 2.6 ab	49.7 ± 3.5 a
15	51.4 ± 1.4 a	44.3 ± 2.3 a	49.4 ± 3.3 a	47.3 ± 3.8 a	39.5 ± 5.0 b	47.3 ± 4.3 ab

Medias ± DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $P \leq 0.05$).

2.4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir que el Ce tiene un efecto bioestimulante en indicadores de crecimiento, reproductivos y de rendimiento, así como en la calidad de frutos en tomate. Estos efectos benéficos son observados en la mayoría de las variables cuando las plantas se trataron con 10 y 15 μM Ce.

Ejemplo del efecto promotor del Ce del crecimiento de plantas se observó después de 164 días de tratamiento donde plantas tratadas con 10 y 15 μM Ce superaron en altura a plantas testigo en 18 y 14.6%.

Por otra parte, si bien el Ce incrementa el número de flores por racimo (dosis de Ce evaluadas tuvieron entre 3 y 4 flores más que racimos de plantas testigo), el amarre de fruto se reduce significativamente por este elemento. Sin embargo, este amarre de fruto bajo no provoca diferencias en el número de frutos entre los tratamientos con Ce y el testigo.

Asimismo, el Ce incrementa el rendimiento en tomate. En particular, la dosis 10 μM Ce incrementó el peso individual de frutos provenientes de tres racimos en 18%, respecto al testigo. El aumento en este tratamiento fue ocasionado por el incremento en 6.3% en el diámetro de fruto, en comparación con el testigo. Por tanto, el rendimiento acumulado de tres racimos aumentó, ya que plantas de los tratamientos con 10 y 15 μM Ce tuvieron mayor producción en 7.8 y 22%, correspondientemente. En lo que a calidad del fruto respecta, el tratamiento con 15 μM Ce incrementó la luminosidad del fruto entre evaluaciones realizadas; asimismo, con este tratamiento se tuvo la menor variación en el valor de hue. En este sentido, el Ce retrasa la evolución del color en el periodo postcosecha, lo cual se traduce en mayor vida de anaquel.

Por otra parte, se registraron incrementos en la concentración de licopeno en frutos del primer racimo; dosis 5, 10 y 15 μM Ce incrementaron el licopeno en 32.9, 40.7, 30.6%, respectivamente, en comparación con el testigo.

Asimismo, la conductividad eléctrica de frutos del segundo y tercer racimos de plantas tratadas con Ce aumentó, en comparación con el testigo.

También se observó que el Ce ocasionó la producción de frutos más ácidos al momento del corte (pH medios de 3.93, 3.71 y 3.72 en los racimos 1, 2 y 3,

respectivamente) que el testigo; y por tanto los frutos de plantas tratadas con Ce tuvieron mayores porcentajes de acidez titulable.

Destaca también los efectos positivos que el Ce tiene en la firmeza de frutos, donde frutos del segundo racimo tratados con 5 μ M Ce fueron superiores en 37.2% a los frutos del testigo. En el caso del racimo 3, los frutos recién cortados y después de 8 d de la cosecha de plantas tratadas con 5 μ M Ce, la firmeza de frutos incrementó en 32.3 y 57.3%, respectivamente, en ambos casos en comparación con el testigo. En frutos del tercer racimo, el tratamiento con 10 y 15 μ M Ce incrementó en 37.3 y 30.7% la concentración de vitamina C, en comparación con el testigo.

Los tratamientos con Ce no influenciaron las pérdidas porcentuales en el peso de los frutos después de 8 d de almacenamiento.

2.5. LITERATURA CITADA

- Achard P, Genschik P. 2009. Releasing the brakes of plant growth: how GAs shutdown DELLA proteins. *Journal of Experimental Botany* 60: 1085-1092. Doi: 10.1093/jxb/ern301
- Adams MW. 1982. Plant architecture and yield breeding. *Iowa State Journal of Research* 56(3): 225-254.
- Adams SR, Cockshull KE, Cave CRJ. 2001. Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Annals of Botany* 88: 869-877. Doi: 10.1006/anbo.2001.1524
- Afsana N, Islam MM, Hossain ME, Nizam R, Monalesa N, Hussain MA, Parvin S. 2017. Response of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to Salicylic Acid and Calcium. *Journal of Applied Life Sciences International* 15(2): 1-7. Doi: 10.9734/JALSI/2017/37408
- Akand MH, Khairul MHEM, Bhagat SK, Moonmoon JF, Moniruzzaman M. 2016. Growth and yield of tomato as influenced by potassium and gibberellic acid. *Bulletin of the Institute of Tropical Agriculture, Kyushu University* 39: 83-94.
- Alcántar-González G, Trejo-Téllez LI. 2013. *Nutrición de cultivos*. 1ra Edición, Mundi-Prensa México, S. A. de C. V. México.

- Alexander L, Grierson D. 2002. Ethylene biosynthesis and action in tomato: a model for climacteric fruit ripening. *Journal of Experimental Botany* 53(377): 2039-2055. <https://doi.org/10.1093/jxb/erf072>
- Arias R, Lee TC, Logendra L, Janes H. 2000. Correlation of lycopene measured by HPLC with the L*, a*, b* color readings of a hydroponic tomato and the relationship of maturity with color and lycopene content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48: 1697-1702. Doi: 10.1021/jf990974e.
- Ariizumi T, Shinozaki Y, Ezura H. 2013. Genes that influence yield in tomato. *Breeding Science* 63(1): 3-13. Doi:10.1270/jsbbs.63.3.
- Atiyeh R, Arancon N, Edwards C, Metzger J. 2000. Influence of earthworm-processed pig manure on the growth and yield of greenhouse tomatoes. *Bioresource Technology* 75(3): 175-180. Doi: 10.1016/s0960-8524(00)00064-x
- Barrett DM, Garcia E, Wayne JE. 1998. Textural modification of processing tomatoes. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 38(3): 173-258.
- Barrios AC, Medina-Velo I, Zuverza-Mena N, Domínguez OE, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresday JL. 2017. Nutritional quality assessment of tomato fruits after exposure to uncoated and citric acid coated cerium oxide nanoparticles, bulk cerium oxide, cerium acetate and citric acid. *Plant Physiology and Biochemistry* 110(2017): 100-107. Doi: 10.1016/j.plaphy.2016.04.017
- Barrios AC, Rico CM, Trujillo-Reyes J, Medina-Velo IA, Peralta-Videa, JR, Gardea-Torresday JL. 2016. Effects of uncoated and citric acid coated cerium oxide nanoparticles, bulk cerium oxide, cerium acetate, and citric acid on tomato plants. *Science of the Total Environment* 563-564: 956-964. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.143
- Basavarajeshwari CP, Hosamani RM, Ajjappalavara PS, Naik BH, Smitha RA, Ukkund KC. 2008. Effect of Foliar Application of Micronutrients on Growth and Yield components of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) *Karnataka Journal of Agricultural Sciences* 21(3): (428-430).

- Batu A. 2004. Determination of acceptable firmness and color values of tomatoes. *Journal of Food Engineering* 61: 471-475. Doi: 10.1016 /S0260-8774(03)00141-9
- Beecher GR. 1998. Nutrient content of tomatoes and tomato products. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine* 218: 98-100.
- Bernier G, Havelange A, Houssa C, Petitjean A, Lejeune P. 1993. Physiological signals that induce flowering. *The Plant Cell* 5: 1147-1155.
- Boland FE. 1990. Fruits and fruit products. In: Helrich, K. (ed.) *Official Methods of Analysis of the Association of Analytical Methods, AOAC*, 15th edition. VA, USA. pp. 910-911.
- Bonhomme F, Kurz B, Melzer S, Bernier G, Jacquard A. 2000. Cytokinin and gibberellin activate SaMADSA, a gene Early bolting in Arabidopsis 511 apparently involved in regulation of the floral transition in *Sinapis alba*. *The Plant Journal* 24: 103-111.
- Borsani J, Budde CO, Porrini L, Lauxmann MA, Lombardo VA, Murray R, Andreo CS, Drincovich MF, Lara MV. 2009. Carbon metabolism of peach fruit after harvest: changes in enzymes involved in organic acid and sugar level modifications. *Journal of Experimental Botany* 60(6): 1823-1837. DOI: 10.1093/jxb/erp055
- Buitrago CM, Rincón MC, Balaguera HE, Ligarreto GA. 2014. Classification of Different Maturity Stages of Agraz (*Vaccinium meridionale* Swartz) Fruit. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín* 68(1): 7521-7531. <http://dx.doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47840>
- Burge J, Mickelsen O, Nicklow C, Marsh GL. 1975. Vitamin C in tomatoes: Comparison of tomatoes developed for mechanical or hand harvesting. *Ecology of Food and Nutrition* 4: 27-31. Doi: 10.1080/03670244.1975.9990403.
- Carpenter D, Boutin C, Allison JE, Parsons JL, Ellis DM. 2015. Uptake and Effects of Six Rare Earth Elements (REEs) on Selected Native and Crop Species Growing in Contaminated Soils. *PLoS One* 10(6): e0129936. Doi: 10.1371/journal.pone.0129936

- Chunbin L, Liu GD, Shen QG, Liang HG. 1990. The role of polygalacturonase pg in tomato fruit ripening and effects of divalent metal ions and ethylene on pg activity. *Acta Botanica Sinica* 32(5): 337-342
- Crelief S, Robert MC, Claude J, Juillerat MA. 2001. Tomato (*Lycopersicon esculentum*) pectin methylesterase and polygalacturonase behaviors regarding heat and pressure-induced inactivation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49: 5566-5575.
- Dávila-Aviña JEJ, Villa-Rodríguez J, Cruz-Valenzuela R, Rodríguez-Armenta M, Espino-Díaz M, Ayala-Zavala JF, Olivas-Orozco GI, Heredia B, González-Aguilar G. 2011. Effect of edible coatings, storage time and maturity stage on overall quality of tomato fruits. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 6: 162-171.
- De Jong M, Wolters-Arts M, García-Martínez JL, Mariani C, Vriezen WH. 2011. The *Solanum lycopersicum* AUXIN RESPONSE FACTOR 7 (SIARF7) mediates cross-talk between auxin and gibberellin signalling during tomato fruit set and development. *Journal of Experimental Botany* 62(2): 617-626. Doi: 10.1093/jxb/erq293
- Di Matteo A, Sacco A, Anacleria M, Pezzotti M, Delledonne M, Ferrarini A, Frusciante L, Barone A. 2010. The ascorbic acid content of tomato fruits is associated with the expression of genes involved in pectin degradation. *BMC Plant Biology* 10: 163. Doi: 10.1186/1471-2229-10-163
- Diatloff E, Smith FW, Asher CJ. 2008. Effects of lanthanum and cerium on the growth and mineral nutrition of corn and mungbean. *Annals of Botany* 101, 971-982.
- Domene RMA, Segura RM. 2014. Parámetros de calidad externa en la industria agroalimentaria. Cajamar. Negocio Agroalimentario y Cooperativo. Ficha de Transferencia. No. 003.
- El-Ishaq A, Obirinakem S. 2015. Effect of Temperature and Storage on Vitamin C Content in Fruits Juice International. *Journal of Chemical and Biomolecular Science* 1: 17-21.

- EL-Kader N, Abd-El-Hamed N, Hussein GM, Fathi M, Abd-El-Aziz N. 2018. Effect of some Rare Earth Elements on Improving Quality, Reducing Nitrate and Nitrate in Superior Grapes. *Middle East Journal of Applied Science* 8(3): 928-938.
- Fernandez V, Sanchez MC, Camara M, Torija ME, Chaya C, Galiana L, Rosello S, Nuez F. 2004. Internal quality characterization of fresh tomato fruits. *Horticultural Science* 39(2): 339-345.
- Francis FJ. 1980. Color quality evaluation for horticultural products crops. *HortScience* 15: 58-59.
- Gaona BEE, Juarez LR. 2005. Evaluacion de variedades de jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill) bajo invernadero en Aquixtla, Puebla. *Fitotecnia. Universidad Autonoma Chapingo. Mexico.* 68 p.
- García-Jiménez A, Gómez-Merino FC, Tejeda-Sartorius O, Trejo-Téllez LI. 2017. Lanthanum Affects Bell Pepper Seedling Quality Depending on the Genotype and Time of Exposure by Differentially Modifying Plant Height, Stem Diameter and Concentrations of Chlorophylls, Sugars, Amino Acids, and Proteins. *Frontiers in Plant Science* 8: 308. Doi: 10.3389/fpls.2017.00308
- Giovannoni JJ, DellaPenna D, Bennett AB, Fischer RL. 2010. Polygalacturonase and Tomato Fruit Ripening. *Horticultural Reviews*, 67–103. Doi: 10.1002/9780470650509.ch2.
- Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI, Cuacua-Temiz C, Jácome-Chacón MA, Senties-Herrera H. 2015. Los elementos benéficos: potencial para innovar la producción agrícola. *Agroentorno* 166: 19-20.
- Guardiola J. 2000. Regulation of flowerint and fruit development: Endogenous factors and exogenous manipulation. *Proceedings of the International Society of Citriculture* 2: 668-672.
- He YW, Loh CS. 2000. Cerium and lanthanum promote floral initiation and reproductive growth of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science* 159: 117-124.
- Ho LC. 1996. The mechanism of assimilate partitioning and carbohydrate compartmentation in fruit in relation to the quality and yield of tomato. *Journal*

- of Experimental Botany 47(Special_Issue): 1239–1243. doi: 10.1093/jxb/47.special_issue.123.
- Herrera-Hernández MG, Núñez-Colín CA, Guzmán-Maldonado SH, Hernández-Martínez MA. 2013. Contents of some antioxidant compounds at three stages of maturity of the mexican serviceberry fruits (*Malacomeles denticulata*) in two localities. Revista Chapingo Serie Horticultura 19(4): 45-57.
- Kabelka E, Yang W, Francis DM. 2004. Improved tomato fruit color within an inbred backcross line derived from *Lycopersicon esculentum* and *L. hirsutum* involves the interaction of loci. Journal of the American Society for Horticultural Science, 129: 250-257.
- Khan A, Sagar G. 1967. The distribution of the products of photosynthesis of the leaves of a tomato plant during the phase of fruit production. Horticultura Research 7: 61-69.
- Kirda C, Cetin M, Dasgan Y, Topcu S, Kaman H, Ekici B, Ozguven AI. 2004. Yield response of greenhouse-grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. Agricultural Water Management 69(3): 191-201. Doi: 10.1016/j.agwat.2004.04.008
- Konica Minolta. 2014. Precise color communication: color control from perception to instrumentation. Disponible en línea en: http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/pdf/color_communication.pdf. Consultado: Octubre 4, 2018
- Lamsal BP, Jindal VK. 2014. Variation in electrical conductivity of selected fruit juices during continuous ohmic heating. KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology 7(1): 47-56.
- Little AC. 1975. Research note off on a tangent. Journal of Food Science 40(2): 410-411.
- Liu D, Wang X, Lin Y, Chen Z, Xu H, Wang L. 2012. The effects of cerium on the growth and some antioxidant metabolisms in rice seedlings. Environmental Science and Pollution Research 19(8): 3282-3291. Doi: 10.1007/s11356-012-0844-x

- Logendra LS, Gianfagna TJ, Specca DR, Janes HW. 2001. Greenhouse Tomato Limited Cluster Production Systems: Crop Management Practices Affect Yield. *Hortscience* 36(5): 893-896.
- López-Moreno ML, De la Rosa G, Hernández-Viezcas JA, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL. 2010. XAScorroboration of the uptake and storage of CeO₂ nanoparticles and assessment of their differential toxicity in four edible plant species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58(6): 3689-3693. DOI: 10.1021/jf904472e
- Ma JJ, Ren YJ, Yan LY. 2014. Effects of Spray Application of Lanthanum and Cerium on Yield and Quality of Chinese Cabbage (*Brassica chinensis* L.) Based on Different Seasons. *Biological Trace Element Research* 160(3): 427-432. Doi: 10.1007/s12011-014-0062-0
- Mahfoudhi N, Chouaibi M, Handi S. 2016. Effectiveness of almond gum trees exudate as a novel edible coating for improving postharvest quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruits. *Food Science and Technology International* 20(1): 33-43. Doi: 10.1177/1082013212469617
- Martínez-Valverde I, Periago MJ, Provan G, Chesson A. 2002. Phenolic compounds, lycopene and antioxidant activity in commercial varieties of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82: 323-330. Doi: 10.1002/jsfa.1035
- McGuire RG. 1992. Reporting of objective color measurements. *HortScience* 27 (12): 1254-1255.
- Méndez II, Vera GAM, Chávez SJL, Carrillo RJC. 2011. Quality of fruits in Mexican tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) landraces. *Vitae* 18: 26-32.
- Muñoz-Ramos J. 2009. Manejo del cultivo de tomate en invernadero. In: J.Z. Castellanos JZ (ed.). *Manual de producción hortícola en invernadero*. INTAGRI. México. pp. 45-91.
- Navarro-López ER, Nieto-Ángel R, Corrales-García J, García-Mateos, MR, Ramírez-Arias A. 2012. Calidad postcosecha en frutos de tomate hidropónico

- producidos con agua residual y de pozo. Revista Chapingo Serie Horticultura 18(3): 263-277.
- NIH. 2016. Datos sobre vitamina C. National Institute of Health. Office of Dietary Supplements. Disponible en línea en: <https://ods.od.nih.gov/pdf/factsheets/VitaminCDatosEnEspañol.pdf>. Consultado: Octubre 2, 2018.
- Nunes MCN. 2008. Color atlas of postharvest quality of fruits and vegetables. John Wiley and Sons, Inc. pp. 239-243. Doi: 10.1002/9780813802947.
- Olaniyi JO, Akanbi WB, Adejumo TA, Akande OG. 2010. Growth, fruit yield and nutritional quality of tomato varieties. African Journal of Food Science 4(6): 398-402.
- Ortega-Martínez LD, Sánchez-Olarte J, Ocampo-Mendoza J, Sandoval-Castro E, Salcido-Ramos BAF, Manzo-Ramos F. 2010. Efecto de diferentes sustratos en crecimiento y rendimiento de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) bajo condiciones de invernadero. Ra Ximhai 6(3): 339-346.
- Pattison RJ, Catala C. 2012. Evaluating auxin distribution in tomato (*Solanum lycopersicum*) through an analysis of the PIN and AUX/LAX gene families. Plant Journal 70: 585-598.
- Peng Q, Zhou Q. 2009. The endogenous hormones in soybean seedlings under the joint action of rare earth element La (III) and ultraviolet-B stress. Biological Trace Element Research 132: 270. Doi: 10.1007/s12011-009-8404-z
- Pérez-Barraza MH, Osuna-Enciso T, Gutiérrez-Espinosa MA, Santiago-Cruz MJ, Avitia-García E, Cano-Medrano R. 2015. Thidiazuron y ácido giberélico en amarre y tamaño de frutos de mango 'ataulfo' polinizados y partenocárpico. Interciencia 40(10): 677-683.

- Polat E, Demir H, Eler F. 2010. Yield and quality criteria in organically and conventionally grown tomatoes in Turkey. *Scientia Agricola* 67: 424-429.
- Polydera AC, Galanou E, Stoforos NG, Taoukis PS. 2004. Inactivation kinetics of pectin methylesterase of greek Navel orange juice as a function of high hydrostatic pressure and temperature process conditions. *Journal of Food Engineering* 62(3): 291-298.
- Ponce O. 1995. Evaluación de diferentes densidades de plantación y niveles de despunte en jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en hidroponía. Tesis profesional. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autonoma de Chapingo, Chapingo, México. 96 p.
- Pramanik K, Priyadarshinee DS, Acharya LK, Jayapuria D. 2017. Role of gibberellic acid on growth, yield and quality of tomato: A Review. *International Journal of Chemical Studies* 5(6): 826-830.
- Radzevičius A, Viškelis P, Bobinas Č. 2008. Quality and physiological parameters of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruits of Lithuanian selection. *Biologija* 54(2): 108-111. Doi: 10.2478/v10054-008-0022-8
- Raffo A, Leonardi C, Fogliano V, Ambrosino P, Salucci M, Gennaro L, Bugianesi R, Giuffrida F, Quaglia G. 2002. Nutritional value of cherry tomatoes (*Lycopersicon esculentum* cv. Naomi F1) harvested at different ripening stages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 6550-6556. Doi: 10.1021/jf020315t
- Rodríguez R, Tavares R, Medina J. 1984. Cultivo moderno del tomate. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. 206 p.
- Sarkar MD, Shah Jahan M, Kabir MH, Kabir K, Rojoni RN. 2014. Flower and Fruit Setting of Summer Tomato Regulated by Plant Hormones. *Applied Science Reports* 7(3): 117-120. Doi: 10.15192/PSCP.ASR.2014.3.3.117120
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT Users Guide. Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA.

- Shamshiri RRM, Jones JW, Thorp KR, Ahmad D, Man HC, Taheri S. 2018. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *International Agrophysics* 32: 287-302. Doi: 10.1515/intag-2017-0005.
- Shanmukhi CH, Reddy MLN, Dorajee Rao AVD, Anji Babu P. 2018. Flowering and yield in processing tomato varieties as influenced by planting density and fertigation. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 7(2): 3481-3485.
- Singh V, Singh SP. 2015. Effect of different storage conditions on ascorbic acid content in tomato and cabbage. *International Journal of Food and Fermentation Technology* 5: 65-68. Doi: 10.5958/2277-9396.2015.00009.4
- Steiner AA. 1984. The universal nutrient solution. *In*: 6th international congress on soilless culture. Wageningen, Holanda. pp. 633-650.
- Stevenson F, Mertens TR. 1980. *Anatomía Vegetal*. Ed. Limusa. México. D. F.
- Story EN, Kopec RE, Schwartz SJ, Harris GK. 2010. An Update on the Health Effects of Tomato Lycopene. *Annual Review of Food Science and Technology* 1: 189-210. Doi: 10.1146/annurev.food.102308.124120
- Syngenta. 2018. Vengador; Características, beneficios y datos técnicos. Disponible en línea en: <https://www.syngenta.com.mx/vengador>. Consultado: Agosto 17, 2018.
- Tagele A, Tesfaye T. 2017. Evaluation of the Performance of Tomato (*Solanum esculentum*) Cultivars at Sekota, North Eastern Ethiopia. *Asian Journal of Agricultural Research* 11: 116-119. Doi: 10.3923/ajar.2017.116.119
- Takhur BR, Singh RK, Nelson PE. 1996. Quality attributes of processed tomato products: A review. *Food Reviews International* 12(3): 375-401. <https://doi.org/10.1080/87559129609541085>
- Tigist M, Workneh TS, Woldetsadik K. 2013. Effects of variety on the quality of tomato stored under ambient conditions. *Journal of Food Science and Technology* 50: 477-486. Doi: 10.1007/s13197-011-0378-0
- Tigist ND, Ali MI, Wosene GA. 2015. Degradation and Formation of Fruit Color in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in Response to Storage Temperature.

- American Journal of Food Technology 10: 147-157. Doi: 10.3923/ajft.2015.147.157
- Tilahun S, Park DS, Taye AM, Jeong CS. 2017. Effects of storage duration on physicochemical and antioxidant properties of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Horticultural Science and Technology. 35: 88-97. Doi: 10.12972/kjhst.20170010
- Tucker G, Grierson D. 1982. Synthesis of polygalacturonase during tomato fruit ripening. Planta 155: 64-67.
- Waliszewski KN, Blasco G. 2010. Propiedades nutraceuticas del licopeno. Salud pública en México 52(3): 254-265.
- Wang J, Wang L, Hu T, Li W, Xue S. 2014. Effects of lanthanum on abscisic acid regulation of root growth in Arabidopsis. Journal of Rare Earths 32: 78-82. Doi: 10.1016/S1002-0721(14)60035-1
- Wang Q, Ma X, Zhang W, Pei H, Chen Y. 2012. The impact of cerium oxide nanoparticles on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and its implications for food safety. Metallomics 4: 1105-1112. Doi: 10.1039/c2mt20149f
- Wereing PE, Patrick J. 1975. Source-sink relations and partition of assimilates. In: Cooper JP (ed.). Photosynthesis and productivity in different environments. Cambridge University Press. pp. 481-499.
- Wrolstad RE, Smith DE. 2010. Colour Analysis. In: Nielson SS (ed.). Food Analysis. Springer Science + Business Media. Boston, MA, USA. pp. 575-586.
- Zheng WW, Park MY, Hirst P, Yoon TM, Chun IJ. 2012. The Accumulation of Rare Earth Elements Fertilizer and its Subsequent Effects on Apple Fruit Quality at Harvest and During Storage. Journal of Bio-Environment Control 21(4): 452-458. Doi: 10.12791/KSBEC.2012.21.4.452
- Zhu XF, Jiang T, Wang ZW, Lei GJ, Shi YZ, Li GX, Zheng SJ. 2012. Gibberellic acid alleviates cadmium toxicity by reducing nitric oxide accumulation and expression of *IRT1* in *Arabidopsis thaliana*. Journal of Hazardous Materials 15(239-240): 302-307. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.08.077