



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

---

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FISIOLOGÍA VEGETAL

## **CERIO EN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD POSCOSECHA DE TULIPÁN (*Tulipa gesneriana* L.)**

TSUJMEJY GÓMEZ NAVOR

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

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

2020

La presente tesis titulada: "**Cerio en la producción y calidad poscosecha de tulipán (*Tulipa gesneriana* L.)**", realizada por la alumna: **Tsujmejy Gómez Navor**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS  
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**FISIOLOGÍA VEGETAL**

**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERA



---

DRA. LIBIA IRIS TREJO-TÉLLEZ

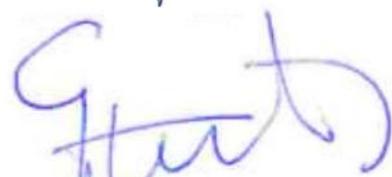
ASESOR



---

DR. FERNANDO CARLOS GÓMEZ MERINO

ASESOR (A)



---

DR. GABRIEL ALCÁNTAR GONZÁLEZ

ASESOR (A)



---

DRA. LETICIA FERNÁNDEZ PAVÍA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2020

# CERIO EN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD POSCOSECHA DE TULIPÁN (*Tulipa gesneriana* L.)

Tsujmejy Gómez Navor, MC  
Colegio de Postgraduados, 2020

## RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones Ce adicionadas tanto en la solución nutritiva como vía foliar, en parámetros de crecimiento y desarrollo, calidad poscosecha, estatus nutrimental y contenido de algunas biomoléculas, en el cultivo de tulipán cv. Jan van Nes. Para lo anterior, se realizaron cuatro experimentos, en todos se emplearon cuatro niveles de Ce (0, 5, 15 y 15  $\mu\text{M}$ ). En un primer experimento, el Ce se suministró junto con la solución nutritiva desde el primer día de la siembra de los bulbos, los resultados muestran que, una baja concentración de Ce (5  $\mu\text{M}$ ) estimulan la brotación y la floración temprana y mejora los parámetros de crecimiento y desarrollo. En contraste, altas dosis de Ce causan efectos negativos, pero aumentan el contenido de azúcares solubles totales, prolina y clorofila. En un segundo experimento se realizaron dos aplicaciones foliares de Ce con intervalos de 15 días. Se encontró que bajas concentraciones de Ce (5 y 15  $\mu\text{M}$ ) muestran efectos negativos o nulos en los parámetros de crecimiento y desarrollo a los 40 días después de la plantación. Sin embargo, después de este periodo, algunos de los parámetros mejoraron con las concentraciones 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce. En el tercer experimento, se evaluó el efecto del Ce aplicado en la solución nutritiva durante el ciclo productivo en la calidad poscosecha y vida de florero. Se observó que 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce mejoran los parámetros de calidad poscosecha, contenido nutrimental y de algunas biomoléculas, pero no prolongó la vida de florero. En el último experimento, se estudió el efecto del Ce suministrado vía foliar durante el ciclo productivo en la calidad poscosecha y vida de florero. Se encontró que el Ce a concentraciones de 5 a 25  $\mu\text{M}$  afecta de manera diferencial los parámetros de calidad, contenido nutrimental y de algunas biomoléculas, sin presentar mejoras en la vida de florero de tulipán. Se concluye que el Ce puede tener efectos horméticos (modelo bifásico dosis-respuesta). Dentro de las perspectivas se recomienda realizar estudios en los que se evalúen mayores rangos de concentraciones, así como, modos, intervalos y tiempos de aplicación de este elemento. De importancia también es la elucidación de los procesos de absorción y acumulación de Ce suministrado a raíz y al follaje. Para esta última forma de suministro de Ce, se sugieren también realizar estudios relacionados con la morfología foliar, incluyendo análisis de potenciales alteración en estomas, y estructura interna de la hoja, entre otros.

**Palabras clave:** bioestimulación, elementos benéficos, elementos de tierras raras, floración temprana, hormesis, *Tulipa gesneriana*, vida de florero

## CERIUM IN TULIP POST-HARVEST PRODUCTION AND QUALITY (*Tulipa gesneriana* L.)

Tsujmejy Gómez Navor, MC  
Colegio de Postgraduados, 2020

### ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the effect of different Ce concentrations added both in nutritive solution and in foliar applications, on growth and development parameters, post-harvest quality, nutritional status, and content of some biomolecules in the tulips cv. Jan van Nes. Therefore, four experiments were carried out, in all of them four Ce levels were used (0, 5, 15 and 15  $\mu\text{M}$ ). In the first experiment, Ce was supplied together with the nutrient solution since the first day of planting the bulbs, the results show that a low concentration of Ce (5  $\mu\text{M}$ ) stimulates early sprouting and flowering and improves growth and development parameters. In contrast, high doses of Ce cause negative effects, but increase the content of total soluble sugars, proline and chlorophyll. In a second experiment, two foliar applications of Ce were sprayed at intervals of 15 days. Low Ce concentrations (5 and 15  $\mu\text{M}$ ) were found to show negative or no effects on growth and development parameters at 40 days after planting. However, after this period, some of the parameters improved with the concentrations of 15 and 25  $\mu\text{M}$  Ce. In the third experiment, the effect of the Ce applied via nutrient solution during the production cycle on postharvest quality and vase life was evaluated. It was observed that 5 and 25  $\mu\text{M}$  Ce improve postharvest quality parameters, nutritional content, and some biomolecules, but did not prolong the vase life. In the last experiment, the effect of the Ce supplied via foliar spray during the productive cycle on postharvest quality and vase life was studied. It was found that Ce concentrations from 5 to 25  $\mu\text{M}$  differentially affect the quality parameters, nutritional content and of some biomolecules, without showing improvements in the vase life of the tulip. It is concluded that Ce can have hormetic effects (biphasic dose-response model). Within the perspectives, it is recommended to carry out studies in which greater ranges of concentrations are evaluated, as well as modes, intervals, and times of application of this element. It is also of importance the elucidation of the processes of absorption and accumulation of Ce supplied to the root and the foliage. For this last form of Ce supply, it is also suggested to carry out studies related to leaf morphology, including analysis of potential alteration in stomata, and internal structure of the leaf, among others.

**Key words:** biostimulation, beneficial elements, rare earth elements, early bloom, hormesis, *Tulipa gesneriana*, vase life

## AGRADECIMIENTOS

**Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por brindarme el apoyo económico para poder concluir mis estudios de postgrado.

**Al Colegio de Posgraduados y todos los que lo integran, en especial al posgrado de Fisiología vegetal y al programa de Edafología** por darme la oportunidad de pertenecer a este grandioso centro de investigación, por ayudarme a formarme como profesionalista y por permitirme adquirir los diferentes conocimientos y experiencias.

**A la Dra. Libia Iris Trejo Téllez** por su amabilidad, disponibilidad, responsabilidad, dedicación, atención en todo momento, apoyo, exigencia y por transmitirme conocimientos muy valiosos.

A los miembros del comité, **Dr. Fernando Carlos Gómez Merino, Dr. Gabriel Alcántar González, Dra. Leticia Fernández Pavía, Dr. Crescenciano Saucedo Veloz**, por su dedicación, apoyo durante el desarrollo y culminación de la tesis.

**A mis padres Libia Navor y Pedro Gómez Vázquez** por su apoyo incondicional, motivaciones, consejos, cariño, por estar siempre cuando los necesito, por todo su esfuerzo y dedicación durante la etapa de formación de mi vida profesional, por que sin ustedes esto no hubiera sido posible. Les estaré eternamente agradecida.

A mi hermana **Matsa Gómez Navor**, por su apoyo, ánimos y por creer siempre en mí.

A **Jorge Alberto** por su gran apoyo y motivación y a **Deysi Vasquez Lopez** por su amistad y apoyo.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE CUADROS .....	xvi
INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
La floricultura y su importancia .....	1
Cultivo de ornamentales en México .....	2
Cultivo de tulipán .....	4
Elementos benéficos.....	5
Bioestimulante vegetal.....	6
Hormesis en planta .....	8
Elementos de tierras raras .....	11
Elemento cerio (Ce): generalidades.....	12
Cerio en la agricultura y sus beneficios en el metabolismo vegetal.....	13
REE en la producción de ornamentales .....	15
Planteamiento del problema .....	16
Objetivo general.....	17
Hipótesis general .....	17
Literatura citada .....	17
CAPÍTULO I. CERIO TIENE UN EFECTO ESTIMULANTE EN PARÁMETROS DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO EN PLANTAS DE TULIPÁN .....	26
1.1 RESUMEN .....	26
1.2 INTRODUCCIÓN .....	27
1.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
1.3.1 Material vegetal y condiciones del experimento .....	29
1.3.2 Tratamiento y diseño experimental.....	30
1.3.3 Variables evaluadas .....	30
1.3.4 Análisis estadístico .....	32
1.4 RESULTADOS.....	32
1.4.1 Parámetros de crecimiento y desarrollo .....	32
1.4.2 Azúcares solubles totales .....	39
1.4.3 Prolina libre total .....	40

1.4.4 Clorofilas <i>a</i> , <i>b</i> , total y carotenoides.....	41
1.5 DISCUSIÓN.....	42
1.6 CONCLUSIÓN.....	47
1.7 LITERATURA CITADA.....	48
CAPÍTULO II. APLICACIÓN FOLIAR DE CERIO EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE TULIPÁN.....	52
2.1 RESUMEN.....	52
2.2 INTRODUCCIÓN.....	53
2.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	54
2.3.1 Material vegetal y condiciones del experimento.....	54
2.3.2 Tratamiento y diseño experimental.....	54
2.3.3 Variables evaluadas.....	55
2.3.4 Análisis estadístico.....	57
2.4 RESULTADOS.....	57
2.4.1 Parámetros de crecimiento y desarrollo.....	57
2.4.2 Azúcares solubles totales.....	63
2.4.3 Prolina libre total.....	64
2.4.4 Clorofilas <i>a</i> , <i>b</i> , total y carotenoides.....	64
2.5 DISCUSIÓN.....	65
2.6 CONCLUSIÓN.....	72
2.7 LITERATURA CITADA.....	72
CAPÍTULO III. CERIO EN LA SOLUCIÓN NUTRITIVA DURANTE EL CICLO PRODUCTIVO: INFLUENCIA EN LA CALIDAD POSCOSECHA DE TULIPÁN.....	77
3.1 RESUMEN.....	77
3.2 INTRODUCCIÓN.....	78
3.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	80
3.3.1 Material vegetal y condiciones del experimento.....	80
3.3.2 Tratamientos y diseño experimental.....	81
3.3.3 Variables evaluadas.....	82
3.3.4 Análisis estadístico.....	84
3.4 RESULTADOS.....	84
3.4.1 Longitud y diámetro de tallo.....	84
3.4.2 Longitud y diámetro del botón floral.....	86
3.4.3 Consumo de agua, peso y masa fresca relativa del tallo floral.....	87
3.4.4 Vida de florero.....	90

3.4.5 Biomosas fresca y seca de los diferentes órganos de tulipán .....	91
3.4.6 Contenido nutrimental en flor, hoja y tallo.....	92
3.4.7 Contenido de azúcares totales en hojas y flores .....	95
3.4.8 Contenido de clorofila .....	96
3.4.9 Contenido de prolina.....	97
3.5 DISCUSIÓN .....	98
3.6 CONCLUSIÓN .....	105
3.7 LITERATURA CITADA.....	105
CAPÍTULO IV. APLICACIÓN FOLIAR DE CERIO EN TULIPÁN ( <i>Tulipa gesneriana</i> L.) DURANTE EL CICLO PRODUCTIVO: EFECTO EN LA CALIDAD POSCOSECHA.....	
4.1 RESUMEN .....	111
4.2 INTRODUCCIÓN .....	112
4.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	113
4.3.2 Tratamientos y diseño experimental .....	113
4.3.3 Variables evaluadas .....	113
4.3.4 Análisis estadístico .....	115
4.3.5 Material vegetal y condiciones del experimento .....	115
4.4 RESULTADOS.....	117
4.4.1 Longitud y diámetro de tallo.....	117
4.4.2 Longitud y diámetro del capullo .....	119
4.4.3 Consumo de agua por periodo y peso fresco del tallo floral .....	120
4.4.4 Vida de florero .....	122
4.4.5 Peso biomasa fresca y seca por órgano.....	123
4.4.6 Contenido nutrimental en flor, hoja y tallo.....	125
4.4.7 Contenido de azúcares totales .....	128
4.4.8 Contenido de clorofilas .....	128
4.4.9 Prolina libre total .....	129
4.5 DISCUSIÓN .....	130
4.6 CONCLUSIÓN .....	137
4.7 LITERATURA CITADA.....	138
CONCLUSIÓN GENERAL .....	143

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1. La hormesis está representada por curvas de dosis-respuesta en forma de U (línea marrón) o en forma de U invertida (línea roja) dependiendo de la variable bajo evaluación..... 9
- Figura 1.2. Relación hipotética de dosis-respuesta hormética junto con características cuantitativas. .... 10
- Figura 2.1. Brotación de bulbo (BROT), formación del botón floral (FBF), coloración de capullos (COL), antesis (ANT) y senescencia (SEN) en plantas de tulipán tratados con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada barra del mismo color, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ ..... 33
- Figura 2.2. Duración de la flor en plantas de tulipán tratados con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada barra, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ . .... 34
- Figura 2.3 Altura de plantas de tulipán 15, 30, 40, 50 y 60 días después de la plantación, tratadas con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ ..... 35
- Figura 2.4 Longitud de hoja del primer (a) y segundo nudo (b) en plantas de tulipán después de 40, 50 y 60 días de la plantación, tratadas con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ ..... 36
- Figura 2.5. Diámetro de tallo basal después de 40 y 60 de la plantación en plantas de tulipán tratadas con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ . .... 37

Figura 2.6. Longitud de capullo floral después de 50 y 60 de la plantación en plantas de tulipán tratadas con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=8. ....	37
Figura 2.7. Peso de biomasa fresca en diferentes órganos de plantas de tulipán tratadas con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva, al final del ciclo del cultivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=8. ....	38
Figura 2.8. Peso de biomasa seca en diferentes órganos de plantas de tulipán tratadas con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva, al final del ciclo del cultivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=8. ....	39
Figura 2.9. Contenido de azúcares totales en hojas (a) y flores (b) de tulipán al final del ciclo productivo tratados con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4.....	40
Figura 2.10. Contenido de prolina en hojas (a) y flores (b) tulipán al final del ciclo productivo tratados con diferentes concentraciones de Ce vía solución nutritiva. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4. ....	41
Figura 2.11 Contenido de clorofilas a, b, total y carotenoides en hojas de tulipán al final del ciclo productivo tratados con diferentes concentraciones de Ce vía solución nutritiva. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4.....	42
Figura 3.1. Formación del botón floral (FBF), coloración de capullos (COL), antesis (ANT) y senescencia (SEN) en plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada barra del mismo color, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=8.....	57

Figura 3.2. Duración de la flor en plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada barra, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=8. ....	58
Figura 3.3. Altura de plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce, a los 40, 50 y 60 días después de la plantación (ddp). Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=8. ....	59
Figura 3.4. Longitudes de hojas del primer (a) y segundo nudo (b) de plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce, a los 40, 50 y 60 días después de la plantación. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=8. ....	60
Figura 3.5. Diámetro de tallo basal en plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce, a los 40 y 60 días después de la plantación. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=8. ....	61
Figura 3.6. Longitud de capullo floral en plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce, a los 50 y 60 días después de la plantación. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=8. ....	61
Figura 3.7. Peso de biomasa fresca al final del ciclo del cultivo, de diferentes órganos de plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=8. ....	62
Figura 3.8. Peso de biomasa seca al final del ciclo del cultivo, de diferentes órganos de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=8. ....	63
Figura 3.9. Contenido de azúcares totales en hojas (a) y flores (b) al final del ciclo productivo, de plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas	

	concentraciones de Ce. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4. ....	63
Figura 3.10.	Contenido de prolina en hojas (a) y flores (b) al final del ciclo productivo, de plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4. ....	64
Figura 3.11.	Contenido foliar de clorofilas a, b, total y carotenoides al final del ciclo de cultivo, de plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4. ....	65
Figura 4.1.	Diámetro de tallos de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada estrato del tallo (basal, medio, superior) y día de evaluación, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=9. ....	86
Figura 4.2.	Consumo de agua de tallos florales de tulipán en florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada evaluación, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=9. ....	88
Figura 4.3.	Peso fresco de tallos florales de tulipán en la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada evaluación, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=9. ....	89
Figura 4.4.	Masa fresca relativa de tallos florales de tulipán durante la vida de florero, proveniente de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. ....	90
Figura 4.5.	Vida de florero de tallos florales de tulipán, proveniente de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada barra, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=9. ....	90

Figura 4.6. Biomasa fresca en diferentes órganos de tulipán y biomasa total al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce vía solución nutritiva. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=9.....	91
Figura 4.7. Biomosas secas de diferentes órganos de tulipán y total al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=9.....	92
Figura 4.8. Contenido de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) y S (f) en diferentes órganos de tallos florales tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con diferentes letras en cada subfigura y órgano, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=5.....	93
Figura 4.9. Contenido de Fe (a), Cu (b), Zn (c), Mn (d) y B (e) en diferentes órganos de tallos florales de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con diferentes letras en cada subfigura y órgano, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=5.....	95
Figura 4.10. Contenido de azúcares solubles totales en hoja (a) y flor (b) de tallos florales de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con diferentes letras en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4. ....	96
Figura 4.11. Contenido de clorofilas a, b, total y carotenoides en hoja de tallos de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con diferentes letras en cada pigmento indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4. ....	97

Figura 4.12. Contenido de prolina en hojas (a) y flores (b) de tallos florales de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con diferentes letras en cada subfigura indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4. ....	98
Figura 5.1. Diámetro de tallos de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada estrato del tallo (basal, medio, superior) y día de evaluación, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=9. ....	118
Figura 5.2. Consumo de agua de tallos florales de tulipán en florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada evaluación, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=9. ....	121
Figura 5.3. Peso fresco de tallos florales de tulipán en la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada evaluación, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=9. ....	122
Figura 5.4. Vida de florero de tallos florales de tulipán, proveniente de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada barra, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=9. ...	123
Figura 5.5. Peso de biomasa fresca de los diferentes órganos de tulipán y total al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=9. ....	124
Figura 5.6. Biomásas secas de diferentes órganos de tulipán y total al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo.	

Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=9.....	124
Figura 5.7. Contenido de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) y S (f) en diferentes órganos de tallos florales tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con diferentes letras en cada subfigura y órgano, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=5.....	126
Figura 5.8. Contenido de Fe (a), Cu (b), Zn (c), Mn (d) y B (e) en diferentes órganos de tallos florales de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con diferentes letras en cada subfigura y órgano, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=5.....	127
Figura 5.9. Contenido de azúcares solubles totales en hoja (a) y flor (b) de tallos florales de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con diferentes letras en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4. ....	128
Figura 5.10. Contenido de clorofilas a, b, total y carotenoides en hoja de tallos de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con diferentes letras en cada pigmento indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4. ....	129
Figura 5.11. Contenido de prolina en hojas (a) y flores (b) de tallos florales de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias $\pm$ DE con diferentes letras en cada subfigura indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4. ....	130

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 4.1. Longitud de tallos de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce vía solución nutritiva en el ciclo productivo. ....	85
Cuadro 4.2. Longitud del botón floral de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. ....	86
Cuadro 4.3. Diámetro del botón floral de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la nutritiva durante el ciclo productivo. ....	87
Cuadro 5.1. Longitud de tallos florales de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministradas vía foliar en el ciclo productivo. ....	117
Cuadro 5.2. Longitud del botón floral de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. ....	119
Cuadro 5.3. Diámetro del botón floral de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. ....	119

## INTRODUCCIÓN GENERAL

### La floricultura y su importancia

La floricultura es una actividad económica importante en muchos países. La industria de las flores comprende el cultivo y el comercio de flores de corte, follaje cortado, plantas en macetas y plantas de cama o en jardín (Van Huylenbroeck, 2010; Chandler y Brugliera, 2011). Considerada también como una actividad competitiva por el desarrollo continuo de la tecnología de los invernaderos y los avances en biotecnología vegetal, condiciones de transporte y estrategias de comercialización (Xia *et al.*, 2006).

El mercado mundial de las flores de corte es una industria dinámica y sus cifras de producción y demanda van en aumento (Milco, 2011; Di Vita *et al.*, 2015). En el 2015, el comercio mundial de flores de corte tuvo un valor aproximado de 15 mil millones de euros (Union Fleurs, 2018). Según datos del índice de complejidad del producto (PCI por sus siglas en inglés), las exportaciones mundiales de flores de corte tuvieron un valor de 8.48 mil millones de dólares en el 2017, lo que representa un aumento del 46% desde 1995 (OEC, 2017). Los Países Bajos ocupan el primer lugar como exportadores de flores en el mundo, con el 50% del total, seguido por Colombia con 16% y en tercer lugar se encuentra Ecuador con el 10%. A éstos les sigue Kenia con el 7%, Etiopía con el 2% y finalmente, los demás exportadores como Bélgica, Italia, Alemania, Israel y España, entre otros, ocupan el 15% restante (Milco, 2011; Expoflores, 2019).

Como ya se mencionó con anterioridad, los Países Bajos son conocidos por su papel de liderazgo en la producción de flores de corte, macetas y bulbos, anuales y perennes (Van Huylenbroeck, 2010); en el 2017, este país exportó un total de aproximadamente 3.68 mil millones de dólares en flores de corte (OEC, 2017). Colombia cuenta con una superficie de 949.8 ha destinada a flores y follajes, con una producción en 2018 de 13 700 toneladas (Agronet, 2018), y con un valor de exportación de 1.4 mil millones de dólares en el 2017 (OEC, 2017). Ecuador tiene una superficie de 4 984 ha sembradas con flores; en 2019, la producción florícola de este país fue de más de 158 mil toneladas con un valor de producción de más de 874 millones de dólares estadounidenses (USD) (Expoflores, 2019). Kenia produjo, en 2017, 159 961.19 toneladas de flores cuyo valor de producción ascendió a más de 769 millones de USD (AFA, 2017). En Etiopía, en el periodo 2017/18, la

floricultura representó el 79% del sector hortofrutícola de este país africano, el cual ocupa una superficie de 10 897.21 ha y está valorado en 307.04 millones de USD (EHPEA, 2020).

En cuanto a importadores, a nivel mundial, los principales son Estados Unidos de América (EUA), la Unión Europea y Rusia; asimismo, se reportó que en 2019 hubo cambios en las importaciones con respecto al 2018 (Expoflores, 2019). Los EUA y la Unión Europea incrementaron sus importaciones en 5.5 y 8.2%, respectivamente; mientras que las importaciones de Rusia disminuyeron un 15.1%. En el mismo año, el valor de las importaciones fue de 1 310, 3 259 y 3 258 millones de USD para EUA, la Unión Europea y Rusia, respectivamente (Expoflores, 2019).

El mercado de EUA lo abastece en su mayoría Colombia y Ecuador y en una mínima parte los Países Bajos, Canadá y México (Expoflores, 2019; Hendricks *et al.*, 2019); mientras que, el mercado de la Unión europea es abastecido principalmente por los Países Bajos, seguido de Kenia, Ecuador, Etiopía y Colombia (Van Huylenbroeck, 2010; Expoflores, 2019). Rusia importa principalmente de Bielorrusia, seguido de los Países Bajos, Ecuador, Kenia y Colombia (Expoflores, 2019).

Según el informe anual Royal FloraHolland (2016), las flores de corte que se comercializan en todo el mundo incluyen rosas, crisantemos (tipo “spray”), tulipanes, liliium, gerberas, lisianthus, crisantemo de solo una flor, freesia y orquídeas cymbidium.

Un grupo de ornamentales de particular interés son los bulbos florales (geófitas), que están agrupados en más de 800 géneros botánicos y juegan un importante papel en la industria de las flores a nivel mundial (Kamenetsky y Okubo, 2013). Son utilizados para la producción comercial de flores de corte, plantas de maceta, material propagativo, así como en las áreas de paisajismo y jardinería. A pesar de la gran cantidad de géneros incluidos en este grupo, la industria florícola está dominado solo por siete de ellos: *Tulipa*, *Lilium*, *Narcissus*, *Gladiolus*, *Hyacinthus*, *Crocus* e *Iris* (Benschop *et al.*, 2010; De Hertog *et al.*, 2013).

### **Cultivo de ornamentales en México**

En México, la floricultura inició entre los años cuarenta y cincuenta con el arribo de un numeroso grupo japonés que buscaba aprovechar la calidad del suelo y el clima de nuestro país para desarrollar sus cultivos de flores (INAES, 2018).

En nuestro país el potencial para la producción y comercialización de plantas y flores de ornato es promisorio. Se ha posicionado como una actividad rentable y generadora de empleos, pues requiere de mucha mano de obra. Se sabe que la floricultura nacional genera más de 250 mil empleos directos y casi un millón de trabajos indirectos anualmente; además, el 60% de la mano de obra de la floricultura es femenina; además, la floricultura se realiza en 13 estados, donde el Estado de México, Morelos, Puebla y la Ciudad de México se colocan como los principales productores ([SADER, 2020a](#)).

La floricultura mexicana tiene diversas ventajas competitivas a nivel internacional, como su posición geográfica con puertos comerciales ubicados en dos océanos, su cercanía con EUA como uno de los principales mercados, y la firma de tratados de libre comercio que le permiten acceso a más de 40 mercados internacionales; estas ventajas, posicionan a México como uno de los principales países exportadores de flores en Latinoamérica ([Tejeda-Sartorius et al., 2015](#)).

En 2016, México tenía 22,700 ha de plantas ornamentales, de las cuales alrededor de 10,000 eran para flores de corte y 1,500 en invernaderos protegidos, pero solo se exportaba entre el 5 y 10% de la producción y el resto se comercializaba en el mercado local ([Hendricks et al., 2019](#)). De acuerdo con [SADER \(2018\)](#), el Estado de México concentra el 90% de la producción y es el único estado de la república con capacidad de exportación, siendo Estados Unidos y Canadá sus principales mercados.

Por su valor económico, entre las principales flores cultivadas se encuentran la rosa y liliom (*azucena*); mientras que, por superficie, las principales son crisantemo y gladiola. De menor importancia podemos enlistar claveles, gerberas, girasoles, tulipanes, y orquídeas ([SADER, 2020a](#)).

A continuación, se abordan aspectos relacionados con la producción en México de las principales especies florícolas; la información se obtuvo del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera ([SIAP, 2018a](#)), con cifras correspondientes al año 2016.

Las rosas (*Rosa spp.*) generaron alrededor de 1 638.9 millones de pesos, siendo los principales estados productores Estado de México, Puebla y Querétaro.

La gladiola (*Gladiolus spp.*), se produce en Puebla, Estado de México y Morelos; en donde, el valor de la producción es de 1 105.3 millones de pesos.

Las azucenas o lirios (*Lilium* spp.) se desarrollan en zonas templadas. Se cultivan en el Estado de México y Veracruz, en donde generan 339.4 millones de pesos.

Las orquídeas (Orchidaceae) se encuentran principalmente en los trópicos y subtrópicos; el valor de la producción de estas ornamentales es de 120.4 millones de pesos. Los principales estados productores son Jalisco y Tamaulipas.

De particular interés es el tulipán holandés (*Tulipa* spp.), el cual, resiste bajas temperaturas y requiere niveles elevados de humedad. Se producción se realiza en la Ciudad de México, con un valor de 4.8 millones de pesos.

### **Cultivo de tulipán**

El tulipán (*Tulipa gesnerinana* L.) es nativo de Asia Central, el Cáucaso y las montañas de Altai, al sur de Siberia en Rusia (Orlikowska *et al.*, 2018). Pertenece a la familia Liliaceae, genero *Tulipa*, un taxón de geófitas con aproximadamente 76 especies y que se encuentra, de forma natural, desde el sur de Europa y norte de África, hasta la región central de Asia (Christenhusz *et al.*, 2013).

Hasta el 2005, el tulipán se producía en, al menos, 15 países con una superficie aproximada de 13 000 ha, en las que la mayor parte (88%) se concentraba en Holanda; mientras que, en otros países (Japón, Francia, Polonia, Alemania y Nueva Zelanda) se cultivaba en áreas de 122 a 300 ha (Buschman, 2005). En la actualidad, Holanda continúa siendo el principal productor de tulipanes a nivel mundial y cuenta con una superficie aproximada de 13 174.51 ha (BKD, 2020). Este país produce más de 4 mil millones de bulbos de tulipán, de los cuales 2.3 mil millones (53%) se utilizan para la producción de flores de corte en Holanda y otros países (Benschop *et al.*, 2010).

En México, los tulipanes se cultivan casi exclusivamente en la Ciudad de México debido a que el cultivo se adapta a zonas frías y templadas; en 2018, su producción generó 9.4 millones de pesos con tan solo 2.4 ha sembradas (SIAP, 2018b). En México, hay dos esquemas de producción de tulipanes. La primera, dedicada a la producción de flor de corte a partir de bulbos comerciales y, la segunda, para cultivos en maceta. Algunas de las variedades que se producen en México son Apeldoorn, Barcelona, Dreamland, Flamingo Parrot, Golden Apeldoorn, Negrita, entre otras (ICAMEX, 2020).

En 2019, se produjeron 326 mil 700 plantas y se estima que, en 2020, se sembrarán 2.6 hectáreas en las alcaldías Xochimilco y Tláhuac para producir cerca de 394,000

plantas, que podría representar 11 millones 820 mil pesos en valor de la producción (SADER, 2020b).

### **Elementos benéficos**

Está bien establecido que para completar satisfactoriamente el ciclo de vida de una planta se requiere de elementos esenciales (Maathuis, 2009; Pilon-Smits *et al.*, 2009; Rouached *et al.*, 2010), los que, son considerados como tales, al cumplir con tres criterios de esencialidad propuestos por Arnon y Stout (1939): 1) el elemento debe de estar involucrado directamente en el metabolismo de la planta, 2) la función del elemento no deber ser reemplazado por otro elemento y, 3) en ausencia de un elemento la planta es incapaz de crecer y desarrollarse exitosamente.

Se considera que, en plantas superiores, 17 elementos reúnen los tres criterios de esencialidad (Barker y Pilbeam, 2007), los cuales se dividen, dependiendo de las cantidades contenidas en los tejidos vegetales, en macronutrientes y micronutrientes. En el primer grupo se incluyen los elementos carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S); mientras que, en el segundo, se encuentran el boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni) y zinc (Zn).

El C, el H y el O representan alrededor del 95% del peso de la materia seca de la planta. Por su parte, el N, P, K, Ca, Mg y S tienen una concentración, en los tejidos vegetales, mayor a 1 000 mg kg<sup>-1</sup> peso seco. Los micronutrientes son requeridos en cantidades muchos más pequeñas, por lo que su concentración es menor a 100 mg kg<sup>-1</sup> de peso seco (Pilon-Smits *et al.*, 2009).

Por otro lado, existen otros elementos no esenciales, o esenciales para ciertas especies, y que tienen efectos beneficiosos para las plantas. Son conocidos como “elementos benéficos” y comprenden a todos aquellos elementos que tienen una utilidad beneficiosa *in planta*, tales como estimular el crecimiento y desarrollo bajo ciertas condiciones, mejorar la calidad de la cosecha, aumentar la vida de florero (Gómez-Merino *et al.*, 2015), así como inducir tolerancia, resistencia, o respuestas de defensa frente a factores estresores abióticos (sequía, salinidad, toxicidad o deficiencias nutrimentales, bajas temperaturas, frío, estrés UV, toxicidad por metales y metaloides no esenciales) y bióticos (ataque de patógenos y herbívoros) que

permiten que las plantas se aclimaten a tales estresores ([Kaur et al., 2015](#); [Trejo-Téllez et al., 2016](#); [Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2018](#)).

Si bien los elementos benéficos pueden promover el crecimiento de varios taxones bajo ciertas condiciones ambientales; la función y la concentración varían para cada elemento y especie de planta. Los efectos benéficos que requieren una alta concentración de tejido sugieren un papel estructural u osmótico; mientras que, los efectos a baja concentración en el tejido pueden indicar un papel como cofactor para enzimas específicas ([Pilon-Smits et al., 2009](#)).

En términos prácticos, los efectos positivos de los elementos benéficos en sistemas hidropónicos se obtienen utilizando concentraciones muy bajas, a nivel micro o milimolar, en soluciones aplicadas vía foliar o a la raíz ([Gómez-Merino et al., 2015](#)).

Hasta la fecha se han reconocido diez elementos benéficos incluidos aluminio (Al), cerio (Ce), cobalto (Co), yodo (I), sodio (Na), lantano (La), selenio (Se), silicio (Si), titanio (Ti) y vanadio (V). Cabe recalcar una vez más que estos elementos mejoran la productividad de los cultivos y la calidad nutricional al estimular diferentes mecanismos moleculares, bioquímicos y fisiológicos que desencadenan respuestas adaptativas a entornos desafiantes. Bajo este contexto, los elementos benéficos están como nuevos bioestimulantes y centrar nuestros estudios en los efectos que tienen las aplicaciones a baja dosis resultarían favorables, no solo para entender los procesos básicos de nutrición, sino que, además, sería posible generar dosis adecuadas para cada cultivo, dando como resultado aumento de la producción, valor nutricional y calidad poscosecha ([Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2018](#)).

### **Bioestimulante vegetal**

Debido al incremento de la población mundial, cambio climático y factores estresantes (suelos salinos, estrés hídrico, sequía, plagas y enfermedades), que representan un riesgo para la estabilidad de la producción hortícola ([Wheeler y Von Braun 2013](#); [Zulfiqar et al., 2019](#)), los objetivos principales de la agricultura moderna se han centrado en la búsqueda de mejores rendimientos, producción eficiente y mejor calidad de los cultivos ([Posmyk y Szafrńska, 2016](#); [Xu y Geelen, 2018](#)). Los bioestimulantes han sido la respuesta para alcanzar dichos objetivos, puesto que ofrecen un enfoque potencialmente novedoso en la regulación/modificación de procesos fisiológicos en las plantas para estimular el crecimiento, mitigar las

limitaciones inducidas por el estrés, optimizar la productividad y aumentar el rendimiento.

A lo largo de los años se han propuesto varios conceptos para definir el término “bioestimulantes” en plantas. Por ejemplo, [Yakhin et al. \(2017\)](#) realizaron una recopilación de la evolución cronológica del término en donde recalcan que varias definiciones son útiles por su amplitud, muchas de ellas tienen limitaciones significativas y son demasiado genéricas; mientras que, varias no excluyen los posibles efectos de los nutrientes contenidos en cualquier producto probable bioestimulante. El concepto más comúnmente citado y que más profundizada el significado del término es el descrito por [Du Jardin \(2012; 2015\)](#) y el Consejo Europeo de la Industria de Bioestimulantes (EBIC, por sus siglas en inglés: [www.biostimulants.eu](http://www.biostimulants.eu)) que lo definen de la siguiente manera:

“Un bioestimulante vegetal es cualquier sustancia o microorganismo aplicado a las plantas con el objetivo de modificar procesos fisiológicos en las plantas para mejorar/beneficiar la absorción de nutrientes, la eficiencia nutricional, la tolerancia al estrés abiótico y/o los rasgos de calidad del cultivo, independientemente de su contenido de nutrientes”.

[Sharma et al. \(2014\)](#), señalan que los bioestimulantes se aplican en pequeñas cantidades, característica que los distingue de los fertilizantes o enmiendas del suelo, que también promueven el crecimiento de las plantas, pero se aplican en grandes cantidades. Se pueden clasificar en siete clases ([Du Jardin, 2015](#)): 1) ácidos húmicos y fúlvicos, 2) hidrolizados de proteínas y otros compuestos que contienen nitrógeno, 3) extractos de algas marinas y productos botánicos, 4) quitosano y otros biopolímeros, 5) hongos beneficiosos, 6) bacterias beneficiosas, y 7) compuestos inorgánicos. Esta clasificación permite evidenciar que los bioestimulantes tienen diferentes funciones fisiológicas en las plantas.

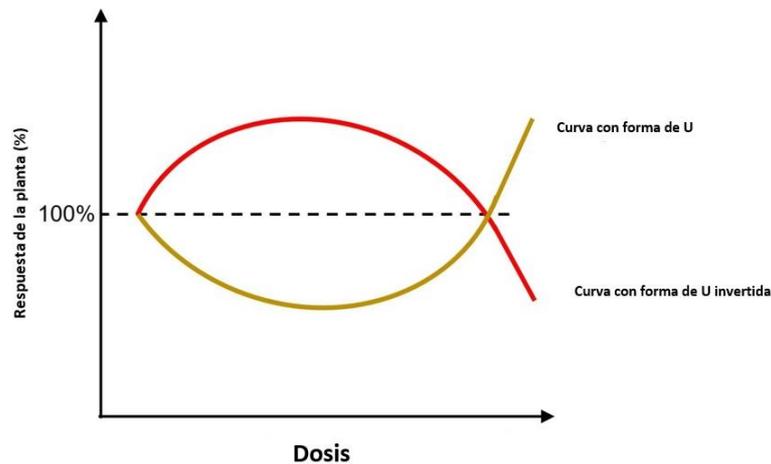
Los elementos benéficos están clasificados dentro de la categoría de compuestos inorgánicos ([Du Jardin, 2015](#)) y cumplen la función de bioestimulantes mejorando actividades fisiológicas de las plantas, tales como el crecimiento y desarrollo de las plantas, calidad de productos vegetales, protección antioxidante, respuestas ante patógenos, calidad fotosintética, la osmorregulación, acumulación de nutrientes, interacción con simbiontes, y síntesis y señalización de hormonas vegetales ([Pilon-Smits et al., 2009](#); [Trejo-Téllez et al., 2016](#)). Todos estos beneficios ocurren cuando se aplica a bajas concentraciones, ya que con una dosis alta resulta en efectos

inhibidores o tóxicos, fenómeno conocido como hormesis ([Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2018](#)).

### **Hormesis en planta**

El concepto de hormesis es central y fundamental en las ciencias biológicas, tiene una amplia gama de implicaciones biológicas y aplicaciones biomédicas ([Calabrese, 2014](#)). La palabra hormesis se usó por primera vez en 1941 en la tesis de maestría de Chester Southam (1919–2002) ([Poschenrieder \*et al.\*, 2013](#)). Se empleó el término para describir la estimulación del crecimiento de hongos en descomposición inducida por bajas dosis de agentes antimicrobianos naturales en madera de cedro. La palabra surgiría cuando el asesor, el profesor John Ehrlich, hizo una corrección a la tesis principal del estudiante, cambiando el término toxicotrofismo a hormesis, sin embargo, fue hasta 1943 que el término fue publicado en la literatura científica ([Calabrese, 2019](#)). La palabra hormesis proviene de la antigua palabra griega *hórmēsis* que significa "poner en movimiento" o "impulsar algo".

La hormesis es definida como un fenómeno bifásico de dosis-respuesta, en el que los efectos estimulantes son observados a dosis bajas y se revierten a dosis más altas ([Calabrese y Blain, 2011](#)), dando como resultado un curva de dosis-respuesta en forma "J" o una "J invertida" (a veces denominada U o U invertida) dependiendo de la variable bajo evaluación ([Ray \*et al.\*, 2014](#); [Carvalho \*et al.\*, 2020](#)), como se observa en la **Figura 1.1**, de modo que la curva no puede ser monotónica, ya que la variable dependiente cambia en más de una dirección con un cambio unidireccional en la variable independiente. Esto contrasta con los dos modelos más tradicionales de dosis-respuesta: el modelo umbral y el modelo lineal sin umbral (LNT).

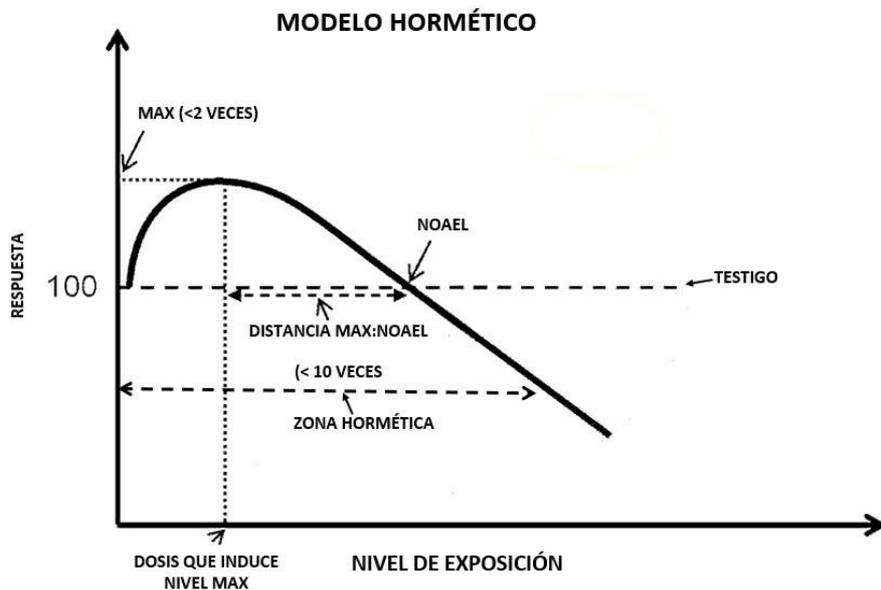


**Figura 1.1.** La hormesis está representada por curvas de dosis-respuesta en forma de U (línea marrón) o en forma de U invertida (línea roja) dependiendo de la variable bajo evaluación. Esta variable puede ser biomasa, longitud, área y/o volumen de toda la planta o sus partes, así como la actividad de diferentes enzimas, contenidos de pigmentos, indicadores de estrés oxidativo, entre otros. Los valores superiores o inferiores al 100% son, respectivamente, aumentos o disminuciones en los valores de las variables evaluadas en las plantas tratadas con diferentes tipos de efectores con respecto al testigo, que son la referencia del valor potencialmente máximo (100%) en una condición ideal de crecimiento (Carvalho *et al.*, 2020).

El fenómeno de hormesis es inducido por un tipo de factor estresante que pueden ser de naturaleza física o química (Lushchak, 2014). Se ha encontrado que varios contaminantes ambientales (metales no esenciales y elementos de tierras raras) inducen hormesis (Poschenrieder *et al.*, 2013; Agathokleous *et al.*, 2018b; Carvalho *et al.*, 2020). Los principales factores que definen la curva de relación dosis-respuesta son el rango y número de niveles de dosis incluidos en el estudio y el momento en que se evalúa las respuestas, después de la administración de un tipo de factor estresante (Agathokleous *et al.*, 2019c).

La respuesta hormética, con características cuantitativas específicas para la amplitud y anchura de la estimulación (Agathokleous *et al.*, 2018a), como se muestra en la **Figura 1.2**, es altamente generalizable e independiente del modelo biológico, punto final, agente inductor, nivel de organización biológica y mecanismo. La hormesis puede ser inducida por una estimulación directa o por una sobrecompensación o una interrupción de la homeostasis (Calabrese *et al.*, 2016). No obstante, Mushak (2016) sugiere más estudios que examinen la respuesta

temporal para comprender la respuesta a lo largo del tiempo y los impactos a largo plazo.



**Figura 1.2.** Relación hipotética de dosis-respuesta hormética junto con características cuantitativas. Los efectos estimulantes ocurren en la región de dosis baja a la izquierda del nivel de efectos no observados (NOAEL), mientras que los efectos adversos ocurren en la región de dosis alta a la derecha del NOAEL (Agathokleous *et al.*, 2019b; Agathokleous *et al.*, 2019c). La respuesta estimulante máxima (MAX) ocurre dentro de la zona de dosis bajas, misma donde acontecen las respuestas adaptativas (zona de estimulación o zona hormética) (Agathokleous *et al.*, 2019b). La estimulación máxima (MAX) suele ser inferior al 200% de la respuesta del testigo, el ancho de la respuesta de estimulación suele ser inferior a 100 veces y la distancia MAX: NOAEL suele ser inferior a 10 veces (Agathokleous *et al.*, 2018a). Cada especie mostrará una zona de estimulación óptima única, desplazándose hacia la izquierda o hacia la derecha en el espectro de dosis-respuesta (Ray *et al.*, 2014; Agathokleous *et al.*, 2018a; Agathokleous *et al.*, 2019d).

En los últimos años, la hormesis se ha considerado como una estrategia general evolutiva al inducir o desarrollar procesos adaptativos a bajas dosis, que protegen a los organismos de agentes estresores a través de los procesos de acondicionamiento/cebado (Calabrese, 2016; Agathokleous *et al.*, 2019c), mediante los cuales las plantas activan mecanismos de tolerancia y, por tanto, pueden protegerse contra un estrés posterior de alto nivel (Agathokleous y Calabrese, 2019). Estos mecanismos incluyen activación de los procesos de señalización y reparación celular, la producción de especies reactivas de oxígeno y antioxidantes

por debajo de ciertos niveles, la regulación de la muerte celular programada y de la desactivación fluorescente fotosintética de la clorofila, y la emisión de compuestos orgánicos volátiles biogénicos (Mark, 2008; Poschenrieder *et al.*, 2013; Agathokleous *et al.*, 2018c; Agathokleous *et al.*, 2019a).

Agathokleous y Calabrese (2019) señalan que los principios de acondicionamiento previo y posterior pueden afectar los fundamentos teóricos y prácticos de la planificación y de los programas agrícolas. Además de mejorar el rendimiento y la productividad de los cultivos, con estos principios también se puede de mejorar las estimaciones de costo-beneficio (Agathokleous *et al.*, 2019b) y obtener información importante sobre la plasticidad biológica de las plantas (Calabrese y Mattson, 2011).

### **Elementos de tierras raras**

Los elementos de tierras raras (REE) son un grupo de 17 elementos químicos de la tabla periódica con propiedades químicas y físicas muy similares; comprenden 15 lantánidos (lantano a lutecio) con números atómicos sucesivos de 57 a 71, más escandio e itrio (Hu *et al.*, 2006; Turra, 2018). Los REEs son trivalentes en todos los sistemas geoquímicos conocidos, con la excepción del europio, iterbio y samario (que también pueden ser divalentes) y el cerio (que también puede ser tetravalente (McLennan y Taylor, 2012).

Los REEs no son en lo absoluto raros, más bien, su nombre está relacionado con su origen. La mayoría de ellos fueron descubiertos en el siglo XIX. Para entonces solo se conocía un depósito de elementos de tierras raras, por lo que se pensaba que eran raros; el término “tierras” se usó en el siglo XVIII para describir sus óxidos, forma por el cual se extrajeron por primera vez la mayoría de los REEs, el óxido de un elemento se conocía como “terre” en francés y en alemán “Erde” que significa tierra, ambos idiomas eran de gran importancia en la ciencia en ese siglo (Migaszewski y Gałuszka, 2015; Voncken, 2016).

Los REEs se pueden encontrar en la naturaleza en forma de compuestos, los métodos de extracción y separación resultan ser difíciles por sus propiedades muy similares; no ocurren en la naturaleza como metales libres, por lo que resulta difícil encontrar depósitos económicamente explotables (Massari y Ruberti, 2013). Las principales fuentes minerales de donde se extraen estos elementos son bastnasita, monacita, xenotima y loparita (Voncken, 2016). De acuerdo con el resumen de

productos minerales del Servicio Geológico de los EE. UU. (USGS) de 2020, China y Brasil poseen las mayores reservas de REEs en el mundo (USGS, 2020).

Los elementos de tierras raras tienen numerosas aplicaciones en diferentes áreas de impacto en la economía global, incluidos medicina, electrónica de consumo, aviación, defensa militar, tecnología moderna (por ejemplo, pantallas de teléfonos inteligentes, computadoras y televisores de pantalla plana, baterías recargables), tecnologías de energía renovables (turbinas eólicas, catalizadores y automóviles eléctricos) y en los últimos años se han empleado en la agricultura (Ramos *et al.*, 2016; Voncken, 2016; Fernandez, 2017; Lin *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2017).

La abundancia de los REEs en la corteza terrestre es significativa, y las concentraciones van en aumento debido a los aportes antropogénicos (Agathokleous *et al.*, 2018b; Turra, 2018). Long *et al.* (2012) sugieren que en la corteza terrestre la concentración promedio estimada de los elementos de tierras raras oscila entre 150 y 220 ppm y, por tanto, son tan abundantes como el cobre y el zinc. Los elementos con mayor abundancia son el lantano y el cerio, ocupando este último, el lugar 25 por su abundancia en la corteza terrestre con una media de 60 ppm (Migaszewski y Gałuszka, 2015).

### **Elemento cerio (Ce): generalidades**

El cerio (Ce) es uno de los 15 elementos químicos clasificados como lantánidos, su símbolo químico es Ce, número atómico 58 y tiene la siguiente configuración electrónica  $4f^{15}d^{1}6s^2$  (Kilbourn, 2000). Fue descubierto y estudiado en 1803 en Suecia por Jöns Jacob Berzelius y Wilhelm von Hisinger. Casi simultáneamente, en Berlín, M. H. Klaproth también descubrió este elemento de forma independiente. Se aisló por primera vez en forma de óxido, Berzelius nombró *ceria* al óxido y *cerio* al nuevo elemento, ambos nombres derivaron del planeta Ceres, que fue descubierto dos años antes por Giuseppe Piazzi y llamado así por la diosa romana de la agricultura (Weeks, 1932).

Es un metal flexible, maleable y dúctil que fácilmente se oxida en presencia de aire; tiene un color que va del gris hierro de grado comercial al plateado cuando está en forma pura; reacciona con agua (lentamente en agua fría y muy rápidamente en agua caliente); tiene una estructura cristalina cúbica centrado en la cara; densidad de  $6.77 \text{ g mL}^{-1}$ , se funde a  $799 \text{ }^\circ\text{C}$ ; su punto de ebullición es de  $3443 \text{ }^\circ\text{C}$  y tiene un

radio metálico de 182 pm (picómetros) (Patnaik, 2003; Habashi, 2013; Scirè y Palmisano, 2020).

El Ce es un metal reactivo que tiene alta afinidad por el oxígeno y el azufre (Kilbourn, 2000). Una característica clave de este elemento es su química redox reversible entre formas trivalentes ( $Ce^{3+}$ ) y tetravalentes ( $Ce^{4+}$ ); el estado tetravalente es la forma más estable en solución acuosa; los cambios de oxidación del cerio permiten una fácil separación de este metal con los otros elementos de tierras raras a través de la oxidación (formando  $CeO_2$ ) seguida de una filtración de solubilidad variable (Piro *et al.*, 2014; Dahle y Arai, 2015; Scirè y Palmisano, 2020).

El Ce se encuentra en varios minerales (carbonatos, silicatos, fosfatos, hidróxidos y óxidos). Las principales fuentes de cerio industrial son minerales como: la monacita [(Ce, La, Th, Nd, Y)PO<sub>4</sub>] y bastnasita [(Ce, La, Y)CO<sub>3</sub>], que pueden contener aproximadamente 47 y 49% de Ce en forma de  $CeO_2$ , respectivamente (Puche *et al.*, 2000; Chakhmouradian y Wall, 2012; Dahle y Arai, 2015). En el suelo, los niveles de Ce varían entre 2 y 150 ppm, con un promedio de 50 ppm; en el mar se puede encontrar en concentraciones de hasta 1.5 ppt (0.0000015 ppm), en tanto en la atmósfera no se ha reportado (Trejo-Téllez *et al.*, 2016).

Las aplicaciones de Ce son diversas gracias a sus propiedades fisicoquímicas únicas. Los compuestos de Ce se han usado ampliamente en polvos para pulir vidrio, imanes permanentes, aleaciones, polvos fluorescentes, pigmentos, catalizadores, paneles solares, diodos emisores de luz, productos farmacéuticos, uso en medicamentos, en la industria alimentaria, así como también en agricultura (Piro *et al.*, 2014; Dahle y Arai, 2015; Zhang *et al.*, 2016; Jiang *et al.*, 2018).

### **Cerio en la agricultura y sus beneficios en el metabolismo vegetal**

Los elementos de tierras raras, en particular el Ce, se ha empleado en la agricultura como suplemento de fertilizantes (al menos en la agricultura de Asia oriental) para incrementar el rendimiento y calidad de los cultivos y hortalizas. Diversos autores señalan que este elemento tiene efectos fisiológicos positivos y negativos *in planta* (Tyler, 2004; Xia *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Jiang *et al.*, 2017) a bajas concentraciones tiene efectos promotores, mientras que en concentraciones relativamente altas puede inhibir el crecimiento de las plantas e incluso causar su muerte. Todo ello depende de la especie vegetal, condiciones de cultivo, tiempo de

exposición y etapa vegetativa (Hu *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2013; Ramírez-Olvera *et al.*, 2018).

En semillas de arroz, natural y artificialmente envejecidas, la aplicación de nitrato de cerio en dosis de 10 y 15  $\mu\text{g mL}^{-1}$ , aumenta significativamente la tasa de germinación, el índice de germinación, el índice de vigor de las semillas y el peso seco por plántula (Fashui, 2002). Ramírez-Olvera *et al.* (2018) reportan un incremento en la altura de la planta, el número de tallos, el volumen de la raíz y la biomasa fresca y seca del brote en el cultivo de arroz con la adición de Ce en la solución nutritiva en dosis de 4 a 12  $\mu\text{M}$ . En el cultivo de cilantro, la aplicación 125  $\text{mg kg}^{-1}$  de nanopartículas de  $\text{CeO}_2$  (NP) produce raíces y brotes significativamente más largos que las plantas testigo (Morales *et al.*, 2013). En espinacas cultivadas bajo condiciones de deficiencia de Ca, la adición de 15  $\mu\text{M}$  Ce, mejora significativamente el área foliar e incrementa las biomásas fresca y seca en 31.83 y 40.98%, respectivamente, comparación con el testigo (Chao *et al.*, 2008).

Aplicaciones foliares de nitrato de cerio en concentraciones de 0.2 a 1.0  $\text{mmol L}^{-1}$  en plántulas de *Cyclocarya paliurus* aumentan el contenido de proteínas, azúcares solubles en hojas, concentración de metabolitos secundarios y elementos minerales K, P, Mg, Mn, Fe y Cu (Xie *et al.*, 2015). En arroz existe evidencia de que el Ce afecta el estado nutricional de raíces y brotes, aumentando la concentración de K, Ca, Mn y Fe en las raíces y de K, Mg, Ca, Na, Zn y Mo en brotes; además de incrementar las actividades de las enzimas del sistema de defensa antioxidante (Liu *et al.*, 2012). En el cultivo de espinaca, la aplicación de Ce también aumenta las actividades de enzimas del sistema de defensa antioxidante; entre ellas superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), ascorbato peroxidasa (APX) y glutatión peroxidasa (GPX) (Chao *et al.*, 2008).

En plántulas *in vitro* de durazno, la adición de 0.3  $\mu\text{mol Ce L}^{-1}$  como cloruro de cerio en el medio de enraizamiento, aumentó las actividades de las enzimas glutamina sintetasa (GS) y glutamato deshidrogenasa (GDH) en el sistema radicular de las plántulas en 330 y 220%, respectivamente; aumentando en un 55% la tasa de asimilación de  $\text{NH}_4^+$  respecto al testigo (Weiping *et al.*, 2003). Resultados similares se han reportado al estudiar plantas expuestas a la deficiencia de  $\text{Mg}^{2+}$  que conducen a la inhibición del metabolismo de N, en este caso la aplicación de 15  $\mu\text{M}$   $\text{Ce}^{3+}$  puede aumentar las actividades de las enzimas clave que regulan el metabolismo del N (Yin *et al.*, 2009).

En plantas de soya bajo estrés por rayos UV-B, el tratamiento con una concentración de 20 mg Ce L<sup>-1</sup> puede aumentar la tasa fotosintética (Mao *et al.*, 2012). En frijol bajo estrés hídrico, la adición de Ce mitiga los efectos negativos de éste, aumenta la tasa de fotosíntesis, el contenido de clorofila y la eficiencia del uso del agua (Salgado *et al.*, 2020). En plántulas de maíz, el Ce reduce la inhibición de la fotosíntesis y del crecimiento, así como daños en los fotosistemas I y II (PSI y PSII) causados por la exposición a la deficiencia de K<sup>+</sup>, el estrés salino y la combinación de ambos (Qu *et al.*, 2013). En plantas de arroz, el Ce puede reducir significativamente la toxicidad por Cd, aumentando el peso fresco, altura de planta y contenido de clorofilas en 24.4, 18.2 y 32.05%, respectivamente, en comparación con el testigo (Wu *et al.*, 2014). Mientras que, en espinaca, el Ce aumenta la resistencia a la toxicidad por Pb y ayuda a mantener la estabilidad de la membrana del cloroplasto (Zhou *et al.*, 2009).

### **REE en la producción de ornamentales**

En la mayor parte de los estudios aquí revisados, la utilización de Ce en ornamentales se limita al empleo de este elemento como solución preservante en florero. En estas investigaciones no se menciona su uso en el ciclo de producción de ornamentales con el objetivo de obtener flores de corte, por lo que se puede informar que no existe un trabajo relacionado con este tema.

Con relación a los REEs, el lantano (La) es el elemento con mayor número de reportes relacionados con su efecto positivo en ornamentales, al incrementar la producción y calidad de flores de corte. Ramírez-Martínez *et al.* (2009) al aplicar La a flores de tulipán a través del fertirriego durante el ciclo productivo en dosis de 10 µM obtuvieron un incremento en la longitud del tallo, diámetro y longitud de botón; además, se promovió la bioacumulación de K y Ca en hojas (Ramírez-Martínez *et al.*, 2012). La adición de La(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> a una concentración de 10 µmol kg<sup>-1</sup> en flores de caléndula, aumenta ligeramente las concentraciones de Zn y Fe (Suzuki *et al.*, 2001).

En diferentes variedades de tulipán la adición por separado de dos fuentes de lantano, LaCl<sub>3</sub> y La(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> × 6H<sub>2</sub>O a una concentración de 40 µM cada una en solución florero, incrementó la concentración de azúcares solubles totales en pétalos y de proteínas solubles totales en hojas. Además, la fuente La(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> × 6H<sub>2</sub>O aumentó el peso fresco de los tallos en florero, prolongó la vida útil de la flor e

incrementó la concentración foliar de clorofilas al final de la vida de florero ([Gómez-Merino et al., 2020](#)). En *lilium*, la adición de 60  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  en florero, aumenta de manera significativa el número de flores abiertas, mientras que disminuye el de flores marchitas ([Shan y Zhao, 2015](#)).

Otro de los REEs que se ha empleado en solución florero es el neodimio, en concentraciones que varían entre 10 y 100  $\mu\text{M}$ , éste aumenta notablemente la vida de florero en *lilium* al incrementar las actividades de las enzimas antioxidantes ascorbato peroxidasa, superóxido dismutasa, catalasa, peroxidasa, glutatión reductasa y glutatión peroxidasa; así también aumenta la concentración de sustancias de ajuste osmótico como azúcar soluble, prolina y proteína soluble, y disminuye la fuga de electrolitos y el contenido de malondialdehído ([Zheng y Guo 2019](#)).

El elemento Ce se ha estudiado en ornamentales como clavel, *lilium* y rosa donde diferentes concentraciones de éste como preservante floral, ha mejorado la vida de florero, así como las actividades de las enzimas de defensa antioxidante y ha reducido de forma drástica los contenidos de peróxido de hidrógeno, fuga de electrolitos y el contenido de malondialdehído. [Zheng y Guo \(2018\)](#) emplearon dosis que variaron entre 10 y 90  $\mu\text{M}$   $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ ; mientras que, [Wang et al. \(2017\)](#) en *Rosa chinensis* Jacq. utilizaron concentraciones entre 10 y 100  $\mu\text{M}$  y en *lilium* se emplearon dosis que oscilaron entre 20 y 120  $\mu\text{M}$  Ce ([Hou et al., 2018](#)).

### **Planteamiento del problema**

En México, la floricultura es una de las actividades más rentables y generadora de empleos. Una de las principales especies florícolas cultivadas en nuestro país es el tulipán, es una especie altamente cotizada al poseer flores elegantes y de vistosos colores, además, su demanda en el mercado nacional e internacional muestra una tendencia creciente. Por tanto, se requiere la producción de flores de calidad. No obstante, este cultivo presenta problemáticas tanto en el proceso de producción como en poscosecha, que determinan la calidad de la flor. Lo anterior obliga a buscar nuevas alternativas de producción, que ayuden a mejorar la calidad de producción y posproducción del cultivo de tulipán, en este estudio en particular, se evaluó el uso del elemento benéfico Ce, se ha documentado que este elemento

umenta la productividad y calidad de diversos cultivos. Además, el Ce no ha sido estudiado en la producción de ornamentales.

## Objetivo general

- ✚ Evaluar el efecto de las diferentes concentraciones Ce adicionado tanto en la solución nutritiva como de manera foliar, en parámetros de crecimiento y desarrollo, calidad poscosecha, estatus nutrimental y contenido de algunas biomoléculas, en el cultivo de tulipán cv. Jan van Nes.

## Hipótesis general

- ✚ Al menos una de las concentraciones de Ce y forma de aplicación influirá de manera positiva en los parámetros de crecimiento y desarrollo, calidad poscosecha, estatus nutrimental y contenido de algunas biomoléculas, en el cultivo de tulipán cv. Jan van Nes.

## Literatura citada

- AFA. 2017. AFA Bulletin Q2 2017-18. Agriculture and Food Authority (AFA). Government of Kenya.
- Agathokleous E, Calabrese EJ. 2019. Hormesis can enhance agricultural sustainability in a changing world. *Global Food Security* 20: 150-155. doi: 10.1016/j.gfs.2019.02.005
- Agathokleous E, Kitao M, Calabrese EJ. 2018a. Environmental hormesis and its fundamental biological basis: rewriting the history of toxicology. *Environmental Research* 165: 274-278. doi: 10.1016/j.envres.2018.04.034
- Agathokleous E, Kitao M, Calabrese EJ. 2018b. The rare earth element (REE) lanthanum (La) induces hormesis in plants. *Environmental Pollution* 238: 1044-1047. doi: 10.1016/j.envpol.2018.02.068
- Agathokleous E, Kitao M, Calabrese EJ. 2018c. Emission of volatile organic compounds from plants shows a biphasic pattern within an hormetic context. *Environmental Pollution* 239: 318-321. doi: 10.1016/j.envpol.2018.04.031
- Agathokleous E, Belz RG, Calatayud V, De Marco A, Hoshika Y, Kitao M, Saitanis CJ, Sicard P, Paolett E, Calabrese EJ. 2019a. Predicting the effect of ozone on vegetation via linear non-threshold (LNT), threshold and hormetic dose-response

- models. *Science of the Total Environment* 649: 61-74. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.264
- Agathokleous E, Kitao M, Calabrese EJ. 2019b. Hormesis: a compelling platform for sophisticated plant science. *Trends in Plant Science* 24(4): 318-327. doi: 10.1016/j.tplants.2019.01.004
- Agathokleous E, Kitao M, Calabrese EJ. 2019c. Hormetic dose responses induced by lanthanum in plants. *Environmental Pollution* 244: 332-341. doi: 10.1016/j.envpol.2018.10.007
- Agathokleous E, Kitao M, Harayama H, Calabrese EJ. 2019d. Temperature-induced hormesis in plants. *Journal of Forestry Research* 30(1): 13-20. doi: 10.1007/s11676-018-0790-7
- Agronet. 2018. Red de información y comunicación del sector Agropecuario Colombiano (Agronet). Ministerio de Agricultura del Gobierno de Colombia. En línea en: <https://www.agronet.gov.co/Paginas/inicio.aspx> Consultado en abril de 2020.
- Arnon DI, Stout PR. 1939. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology* 14(2): 371-375.
- Barker AV, Pilbeam DJ. 2007. Introduction. *In*: Barker AV, Pilbeam DJ (eds.), *Handbook of Plant Nutrition*, pp. 3-13. Taylor & Francis Group.
- Benschop M, Kamenetsky R, Le Nard M, Okubo H, De Hertogh A. 2010. The global flower industry: production, utilization, research. *Horticultural Reviews* 36: 1-115.
- BKD. 2020. Provisional spring flowering statistics 2019-2020 (in German). Flower Bulb Inspection Service (BKD): Lisse (The Netherlands). Disponible en línea en: <https://www.bkd.eu/onze-dienstverlening/voorlopige-statistieken/>. Consultado: abril 2020.
- Buschman J. 2005. Globalisation – flower – flower bulbs – bulb flowers. *Acta Horticulturae* 673: 27-33. doi: 10.17660/actahortic.2005.673.1
- Calabrese EJ. 2014. Hormesis: a fundamental concept in biology. *Microbial Cell* 1(5): 145-149. doi: 10.15698/mic2014.05.145
- Calabrese EJ. 2016. Preconditioning is hormesis part I: Documentation, dose-response features and mechanistic foundations. *Pharmacological Research* 110: 242-264. doi: 10.1016/j.phrs.2015.12.021
- Calabrese EJ. 2019. The Dose–Response Revolution: How Hormesis Became Significant: An Historical and Personal Reflection. *In*: Rattan SIS, Kyriazis M. (eds), *The Science of Hormesis in Health and Longevity*. Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-814253-0.00001-2
- Calabrese EJ, Blain RB. 2011. The hormesis database: the occurrence of hormetic dose responses in the toxicological literature. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 61(1): 73-81. doi: 10.1016/j.yrtph.2011.06.003
- Calabrese EJ, Dhawan G, Kapoor R, Iavicoli I, Calabrese V. 2016. HORMESIS: a fundamental concept with widespread biological and biomedical applications. *Gerontology* 62(5): 530-535. doi: 10.1159/000441520

- Calabrese EJ, Mattson MP. 2011. Hormesis provides a generalized quantitative estimate of biological plasticity. *Journal of Cell Communication and Signaling* 5(1): 25-38. doi: 10.1007/s12079-011-0119-1
- Carvalho ME, Castro PR, Azevedo RA. 2020. Hormesis in plants under Cd exposure: from toxic to beneficial element? *Journal of Hazardous Materials* 384: 1-9. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121434
- Chakhmouradian AR, Wall F. 2012. Rare earth elements: minerals, mines, magnets (and more). *Elements* 8(5): 333-340. doi: 10.2113/gselements.8.5.333
- Chandler SF, Brugliera F. 2011. Genetic modification in floriculture. *Biotechnology Letters* 33(2): 207-214. doi: 10.1007/s10529-010-0424-4
- Chao L, Bofu P, Weiqian C, Yun L, Hao H, Liang C, Xiaoqing L, Xiao W, Fashui H. 2008. Influences of calcium deficiency and cerium on growth of spinach plants. *Biological Trace Element Research* 121(3): 266-275. doi: 10.1007/s12011-007-8054-y
- Christenhusz M, Govaerts R, David J, Hall T, Borland K, Roberts P, Fay M. 2013. Tiptoe through the tulips – cultural history, molecular phylogenetics and classification of *Tulipa* (Liliaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society* 172: 280-328. doi: 10.1111/boj.12061
- 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
- De Hertog A, van Scheepen J, Le Nard M, Okubo H, Kamenetsky R. 2013. Globalization of the Flower Bulb Industry. *In: Kamenetsky R, Okubo H. (eds.), Ornamental Geophytes. From basic science to sustainable production*, pp. 1-16. CRC Press.
- Di Vita G, Allegra V, Zarbà AS. 2015. Building scenarios: a qualitative approach to forecasting market developments for ornamental plants. *International Journal of Business and Globalisation* 15(2): 130-151.
- 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](https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/169257/1/plant_Biostimulants_final_report_bio_2012_en.pdf). Consultado: abril 2020.
- 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
- EHPEA. 2020. Ethiopian Horticulture Producer Exporters Association (EHPEA). Disponible en línea en: <https://ehpea.org/>. Consultado: abril de 2020.
- Expoflores. (2019). Informe Anual de Exportaciones 2019. Informes económicos. Expoflores: Ecuador.
- 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
- Fernandez V. 2017. Rare-earth elements market: A historical and financial perspective. *Resources Policy* 53: 26-45. doi: 10.1016/j.resourpol.2017.05.010

- Gómez-Merino FC, Ramírez-Martínez M, Castillo-González AM, Trejo-Téllez LI. 2020. Lanthanum prolongs vase life of cut tulip flowers by increasing water consumption and concentrations of sugars, proteins and chlorophylls. *Scientific Reports* 10(1): 1-13. doi: 10.1038/s41598-020-61200-1
- 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.
- Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI. 2018. The role of beneficial elements in triggering adaptive responses to environmental stressors and improving plant performance. *In: Vats S. (ed.), Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants*, pp.137-172. Springer. doi: 10.1007/978-981-10-9029-5\_6
- Habashi F. 2013. Cerium, Physical and Chemical Properties. *In: Kretsinger RH, Uversky VN, Permyakov EA. (eds.), Encyclopedia of Metalloproteins*, pp. 588-588. Springer. doi: 10.1007/978-1-4614-1533-6
- Hendricks J, Briercliffe T, Oosterom B, Treer A, Kok G, Edwards T, Kong H. 2019. Production and markets, the future of ornamentals. AIPH, International Association of Horticultural Producers. United Kingdom.
- Hou K, Bao D, Shan C. 2018. Cerium improves the vase life of *Lilium longiflorum* cut flowers through ascorbate-glutathione cycle and osmoregulation in the petals. *Scientia Horticulturae* 227: 142-145. doi: 10.1016/j.scienta.2017.09.040
- Hu Z, Haneklaus S, Sparovek G, Schnug E. 2006. Rare earth elements in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37(9-10): 1381-1420. doi: 10.1080/00103620600628680
- ICAMEX. 2020. Cultivo de tulipán. Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuicultura y Forestal del Estado de México (ICAMEX). Disponible en línea en: <http://icamex.edomex.gob.mx/>. Consultado: abril de 2020.
- INAES. 2018. Historia de la Floricultura en México. Instituto Nacional de Economía Social (INAES). Disponible en línea en: <https://www.gob.mx/inaes/es/articulos/historia-de-la-floricultura?idiom=es>. Consultado: abril de 2020.
- Jiang J, Hu J, Xie Z, Cao Q, Ma D, Han Y, Li Z. 2017. The trivalent cerium-induced cell death and alteration of ion flux in sweetpotato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam]. *Journal of Rare Earths* 35(12): 1273-1282. doi: 10.1016/j.jre.2017.06.006
- Kamenetsky R, Okubo H. 2013. Introduction. *In: Kamenetsky R, Okubo H (eds.), Ornamental Geophytes. From Basic Science to Sustainable Production*, pp. xv-xvii. CRC Press.
- Kaur S, Kaur N, Siddique KH, Nayyar H. 2015 Beneficial elements for agricultural crops and their functional relevance in defence against stresses. *Archives of Agronomy and Soil Science* 62(7): 905-920. doi: 10.1080/03650340.2015.1101070
- Kilbourn BT. 2000. Cerium and cerium compounds. *In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, pp. 1-23. doi: 10.1002/0471238961.0305180911091202.a01.pub2

- Lin R, Howard BH, Roth EA, Bank TL, Granite EJ, Soong Y. 2017. Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations. *Fuel* 200: 506-520. doi: 10.1016/j.fuel.2017.03.096
- 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
- Long KR, Van Gosen BS, Foley NK, Cordier D. 2012. The principal rare earth elements deposits of the United States: a summary of domestic deposits and a global perspective. *In: Sinding-Larsen R, Wellmer FW (eds.), Non-renewable resource issues*, pp. 131-155. Springer. doi: 10.1007/978-90-481-8679-2
- Lushchak VI. 2014. Dissection of the hormetic curve: analysis of components and mechanisms. *Dose-Response* 12(3): 466-479. doi: 10.2203/dose-response.13-051
- Maathuis FJM. 2009. Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology* 12(3): 250-258. doi: 10.1016/j.pbi.2009.04.003
- Mao C X, Chen MM, Wang L, Zou H, Liang C J, Wang L H, Zhou Q. 2012. Protective effect of cerium ion against ultraviolet B radiation-induced water stress in soybean seedlings. *Biological Trace Element Research* 146: 381-387. doi: 10.1007/s12011-011-9264-x
- Mark PM. 2008. Hormesis defined. *Ageing Research Reviews* 7(1): 1-7. doi: 10.1016/j.arr.2007.08.00
- Massari S, Ruberti M. 2013. Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy* 38(1): 36-43. doi: 10.1016/j.resourpol.2012.07.00
- McLennan SM, Taylor SR. 2012. Geology, geochemistry, and natural abundances of the rare earth elements. *In: Atwood DA (ed.), The Rare Earth Elements. Fundamentals and Applications*, pp. 1-19, John Wiley y Sons Ltd.
- Migaszewski ZM, Gałuszka A. 2015. The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 45(5): 429-471. doi: 10.1080/10643389.2013.866622
- Milco R. 2011. The global competitiveness of the Kenyan flower industry. ProVerde-Worldbank Technical Paper.
- Morales MI, Rico CM, Hernandez-Viezcas JA, Nunez JE, Barrios AC, Tafoya A, Flores-Marges JP, Peralta-Videa PR, 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
- Mushak P. 2016. Temporal stability of chemical hormesis (CH): Is CH just a temporary stop on the road to thresholds and toxic responses? *Science of the Total Environment* 569-570: 1446-1456. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.233

- OEC. 2017. The Observatory of Economic Complexity. Cut flowers and flower buds for bouquets, etc., fresh Disponible en línea en: <https://oec.world/en/>. Consultado: abril de 2020.
- Orlikowska T, Podwyszyńska M, Marasek-Ciołakowska A, Sochacki D, Szymański R. 2018. Tulip. *In: Van Huylbroeck (ed.), Ornamental Crops, Handbook of Plant Breeding* 11, pp. 769-802. Springer.
- Patnaik P. 2003. Handbook of inorganic chemicals. McGraw-Hill.
- Pilon-Smits EA, Quinn CF, Tapken W, Malagoli M, Schiavon M. 2009. Physiological functions of beneficial elements. *Current Opinion in Plant Biology* 12(3): 267-274. doi: 10.1016/j.pbi.2009.04.009
- Piro NA, Robinson JR, Walsh PJ, Schelter EJ .2014. The electrochemical behavior of cerium (III/IV) complexes: Thermodynamics, kinetics and applications in synthesis. *Coordination Chemistry Reviews* 260: 21-36. doi: 1016/j.ccr.2013.08.034
- Poschenrieder C, Cabot C, Martos S, Gallego B, Barceló J. 2013. Do toxic ions induce hormesis in plants? *Plant Science* 212: 15-25. doi: 10.1016/j.plantsci.2013.07.012
- Posmyk MM, Szafrńska K. 2016. Biostimulators: a new trend towards solving an old problem. *Frontiers in Plant Science* 7: 748. doi: 10.3389/fpls.2016.00748
- Puche RS, Cascales C, Porcher P, Maestro P. 2000. Tierras raras: materiales avanzados. *Anales de la Real Sociedad Española de Química* 4: 11-26.
- Qu, C, Liu C, Guo F, Hu C, Ze Y, Li C, Zhou Q, Hong, F. 2013. Improvement of cerium on photosynthesis of maize seedlings under a combination of potassium deficiency and salt stress. *Biological Trace Element Research* 155(1): 104-113. doi: 10.1007/s12011-013-9767-8
- Ramírez-Martínez M, Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI, Hernández I, Osorio B, Castillo AM, Hernández E. 2009. *Acta Horticulturae* 847: 295-300. doi: 10.17660/ActaHortic.2009.847.39
- Ramírez-Martínez M, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Castillo-González AM, Hernández-Ríos I, Hernández-Acosta E. 2012. Bioacumulación de potasio, calcio y lantano en tulipán tratado con lantano. *Terra Latinoamericana* 30(3): 229-238.
- 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): 1-19. doi: 10.1371/journal.pone.0194691
- Ramos SJ, Dinali GS, Oliveira C, Martins GC, Moreira CG, Siqueira JO, Guilherme LR. 2016. Rare earth elements in the soil environment. *Current Pollution Reports* 2(1): 28-50. doi: 10.1007/s40726-016-0026-4
- Ray SD, Farris FF, Hartmann AC. 2014. Hormesis. *In: Wexler P, Encyclopedia of Toxicology*, pp. 44-948. Third Edition. Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00398-5
- Rouached H, Secco D, Arpat BA. 2010. Regulation of ion homeostasis in plants: current approaches and future challenges. *Plant Signaling & Behavior* 5(5): 501-502. doi: 0.4161/psb.11027

- Royal FloraHolland. 2016. Annual Report- Flowering the world. Disponible en línea en: <https://www.royalfloraholland.com/>. Consultado: abril de 2020.
- SADER. 2018. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Floricultura, cultivando belleza y ganancias. Disponible en línea en: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/floricultura-cultivando-belleza-y-ganancias>. Consultado: abril 2020.
- SADER. 2020a. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Con amor, lo más bello del campo mexicano. Disponible en línea en: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/con-amor-lo-mas-bello-del-campo-mexicano?idiom=es>. Consultado: abril de 2020-
- SADER. 2020b. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), delegación Ciudad de México. La floricultura en la Ciudad de México. Disponible en línea en: <https://www.gob.mx/agricultura/cdmx/articulos/la-floricultura-en-la-ciudad-de-mexico?idiom=es>. Consultado: abril 2020
- Salgado OGG, Teodoro JC, Alvarenga JP, de Oliveira C, de Carvalho TS, Domiciano D, Marchiori PER, Guilherme LRG. 2020. Cerium alleviates drought-induced stress in *Phaseolus vulgaris*. *Journal of Rare Earths* 38(3): 324-331. doi: 10.1016/j.jre.2019.07.014
- Scirè S, Palmisano L. 2020. Cerium and cerium oxide: A brief introduction. *In*: Scirè S, Palmisano L (eds.), *Cerium Oxide (CeO<sub>2</sub>): Synthesis, Properties and Applications*, pp. 1-12. Elsevier.
- Shan C, Zhao X. 2015. Lanthanum delays the senescence of *Lilium longiflorum* cut flowers by improving antioxidant defense system and water retaining capacity. *Scientia Horticulturae* 197: 516-520. doi: 10.1016/j.scienta.2015.10.012
- Sharma HS, Fleming C, Selby C, Rao JR, Martin T. 2014. Plant biostimulants: a review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management to reduce abiotic and biotic stresses. *Journal of Applied Phycology* 26(1): 465-490. doi: 10.1007/s10811-013-0101-9
- SIAP. 2018a Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Flores mexicanas: Un gran detalle que fortalece el crecimiento económico del país. Disponible en línea en: <https://www.gob.mx/siap/articulos/flores-mexicanas-un-gran-detalle-que-fortalece-el-crecimiento-economico-del-pais?idiom=es> Consultado: abril de 2020.
- SIAP. 2018b. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Disponible en línea en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Consultado: mayo de 2020.
- Suzuki H, Kumagai H, Mori F, Sakamoto K, Inubushi K, Enomoto S. 2001. Influence of lanthanum on the uptake of various elements by marigold. *Riken Review* 35: 80-81.
- Tejeda-Sartorius O, Ríos-Barreto Y, Trejo-Téllez LI, Vaquera-Huerta H. 2015. Caracterización de la producción y comercialización de flor de corte en Texcoco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6(5): 1105-1118.
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Alcántar-González G. 2016. Elementos benéficos: potencialidades y limitantes. *In*: Alcántar-González G, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino

- FC (eds), Nutrición de cultivos, Segunda edición, pp. 59-101. Biblioteca Básica de Agricultura.
- Turra C. 2018. Sustainability of rare earth elements chain: from production to food—a review. *International Journal of Environmental Health Research* 28(1): 23-42. doi: 10.1080/09603123.2017.1415307
- Tyler G. 2004. Rare earth elements in soil and plant systems-A review. *Plant and Soil* 267(1-2): 191-206. doi: 10.1007/s11104-005-4888-2
- Union Fleurs - International Flower Trade Association. 2018. The floriculture supply-chain: characteristics & prospects. Amsterdam.
- USGS. 2020. U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries: rare earths. Available online at [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov). Consulted in May 2020
- Van Huylenbroeck J. 2010. Status of Floriculture in Europe. *In: Jain S, Ochatt S (eds.), Protocols for in vitro propagation of ornamental plants. Methods in molecular biology (Methods and Protocols)* 589: 365-376. Humana Press. doi: 10.1007/978-1-60327-114-1\_31
- Voncken JHL. 2016. The ore minerals and major ore deposits of the Rare Earths. *In: Voncken JHL (ed.), The Rare Earth Elements*, pp. 15-52. Springer Briefs in Earth Sciences. doi: 10.1007/978-3-319-26809-5
- Wang Q, Mu J, Shan C, Wang W, Fu S. 2017. Effects of cerium on the antioxidant defence system in the petals and the contents of pigments in the calyces of *Rosa chinensis* Jacq. cut flower. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 92(6): 630-635. doi: 10.1080/14620316.2017.1338924
- 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
- Weiping S, Fashui H, Zhigang W, Yuzhen Z, Fugen G, Hongoing X, Mingliang Y, Youhong C, Mizhen Z, Jiale S. 2003. Effects of cerium on nitrogen metabolism of peach plantlet *in vitro*. *Biological Trace Element Research* 95: 259-268. doi: 10.1385/BTER:95:3:259
- Wheeler T, Von Braun J. 2013. Climate change impacts on global food security. *Science* 341(6145): 508-513. doi: 10.1126/science.1239402
- Wu M, Wang PY, Sun LG, Zhang JJ, Yu J, Wang YW, Chen GX. 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: 251-260. doi: 10.1007/s10725-014-9916-x
- Xia CF, Jin JC, Yuan L, Zhao J, Chen XY, Jiang FL, Qin CQ, Dai J, Liu Y. 2013. Microcalorimetric studies of the effect of cerium (III) on isolated rice mitochondria fed by pyruvate. *Chemosphere* 91(11): 1577-1582. doi: 10.1016/j.chemosphere.2012.12.049
- Xia Y, Deng X, Zhou P, Shima K, Teixeira da Silva JA. 2006. The world floriculture industry: dynamics of production and markets. *Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology, Advances in Tropical Issues* 4: 336-347.

- Xie Y, Li Y, Liu N, Zhang Y, Guo N, Wang T, Shang X. 2015. Effects of cerium nitrate on the growth and physiological characteristics in *Cyclocarya paliurus* seedlings. *Journal of Rare Earths* 33(8): 898-904. doi: 10.1016/S1002-0721(14)60502-0
- Xu L, Geelen D. 2018: Developing biostimulants from agro-food and industrial by-products. *Frontiers in Plant Science* 9: 1567. doi: 10.3389/fpls.2018.01567
- Yakhin OI, Lubyantsev AA, Yakhin IA, Brown PH. 2017. Biostimulants in plant science: a global perspective. *Frontiers in Plant Science* 7: 2049. doi: 10.3389/fpls.2016.02049
- Yin S, Ze Y, Liu C, Li N, Zhou M, Duan Y, Hong F. 2009. Cerium relieves the inhibition of nitrogen metabolism of spinach caused by magnesium deficiency. *Biological Trace Element Research* 132(1-3): 247-258. doi: 10.1007/s12011-009-8392-z
- 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. doi: 10.1016/j.apsb.2012.12.005
- Zhang J, Zhao B, Schreiner B. 2016. Separation hydrometallurgy of rare earth elements. pp. 3. Springer International Publishing.
- Zheng M, Guo Y. 2018. Cerium improves the vase life of *Dianthus caryophyllus* cut flower by regulating the ascorbate and glutathione metabolism. *Scientia Horticulturae* 240: 492-495. doi: 10.1016/j.scienta.2018.06.046
- Zheng M, Guo Y. 2019. Effects of neodymium on the vase life and physiological characteristics of *Lilium Casa Blanca* petals. *Scientia Horticulturae* 256: 108553. doi: 10.1016/j.scienta.2019.108553
- Zhou B, Li Z, Chen C. 2017. Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals* 7(203): 1-14. doi: 10.3390/min7110203
- Zhou M, Ze Y, Li N, Duan Y, Chen T, Liu C, Hong F. 2009. Cerium relieving the inhibition of photosynthesis and growth of spinach caused by lead. *Journal of Rare Earths* 27(5): 864-869. doi: 10.1016/S1002-0721(08)60351-8
- Zulfiqar F, Casadesús A, Brockman H, Munné-Bosch S. 2019. An overview of plant-based natural biostimulants for sustainable horticulture with a particular focus on moringa leaf extracts. *Plant Science* 110194. doi: 10.1016/j.plantsci.2019.110194

# **CAPÍTULO I. CERIO TIENE UN EFECTO ESTIMULANTE EN PARÁMETROS DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO EN PLANTAS DE TULIPÁN**

## **1.1 RESUMEN**

El cerio (Ce) es uno de los elementos de tierras raras más utilizados en la agricultura; en bajas concentraciones puede estimular el crecimiento y desarrollo de las plantas superiores, presentando efectos adversos en altas concentraciones. El objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto del Ce en parámetros de crecimiento, desarrollo y contenido de biomoléculas en plantas de tulipán cv. Jan van Nes. Para la obtención de las plantas de tulipán se sembraron bulbos comerciales (calibre 12+) que fueron cultivadas bajo condiciones de malla sombra, durante el periodo otoño-invierno. Los niveles de Ce empleados fueron 5, 15 y 15  $\mu\text{M}$  a partir de  $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; además de un testigo, sin aplicación de Ce, suministrado en la solución nutritiva desde el primer día de siembra. Los resultados muestran que las diferentes concentraciones de Ce estimulan la brotación de bulbos. La concentración baja de Ce (5  $\mu\text{M}$ ) promueve la formación temprana de botones florales; la coloración, por ende, adelanta la floración de tulipán, sin presentar cambios en el periodo de tiempo para alcanzar la senescencia, mientras que, una alta concentración 25  $\mu\text{M}$  tuvo un efecto opuesto. La duración de la flor no presenta efectos significativos. Una dosis baja de Ce (5  $\mu\text{M}$ ) incrementó de manera significativa la altura de planta en las primeras tres evaluaciones (15, 30 y 40 ddp), la longitud de hojas tanto del primer como del segundo nudo en todas las evaluaciones y la longitud de capullo a los 50 ddp; en contraste, una dosis 15  $\mu\text{M}$  Ce redujo la altura de planta (15, 30, 40 y 50 ddp). Dosis de Ce de 15 y 25  $\mu\text{M}$  tuvieron efectos negativos en la longitud de hojas de primer nudo a los 40 ddp y 25  $\mu\text{M}$  en el segundo nudo. El peso de las biomásas fresca y seca de la flor y tallo fue significativamente mayor en las plantas tratadas con altas concentraciones de Ce (25  $\mu\text{M}$ ), efectos adversos se presentaron con 5  $\mu\text{M}$  Ce, dosis que redujo la biomasa fresca de tallo, pero aumentó la de bulbo, en tanto que 15  $\mu\text{M}$  Ce redujo el peso de la biomasa seca de la flor y las concentraciones 5 y 15  $\mu\text{M}$  Ce la de tallo. El contenido de azúcares solubles totales y prolina en flores y hojas de tulipán evaluadas al final del ciclo de cultivo aumentaron de manera significativa con 25  $\mu\text{M}$  Ce; mientras que, las dosis 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentaron el contenido de clorofila a, total y carotenoides. En conclusión, dosis bajas de Ce promueven el crecimiento,

desarrollo y floración; por el contrario, altas dosis de Ce causan efectos negativos, por lo que se evidencia el efecto hormético de este elemento. Asimismo, altas dosis de Ce incrementan los contenidos de biomoléculas como azúcares solubles totales, prolina y pigmentos fotosintéticos.

## 1.2 INTRODUCCIÓN

Los elementos de tierras raras (REE) son una familia de 17 elementos químicos formados por el grupo III de la tabla periódica (escandio e itrio) y la serie de lantánidos (lantano a lutecio) que exhiben similitudes químicas como grupo, mientras que, expresan individualmente propiedades electrónicas distintivas y variadas (Voncken, 2016; Cheisson y Schelter, 2019). De particular importancia para esta investigación es el cerio (Ce), descubierto en 1803 en Suiza por J. J. Berzelius y W. Hisinger, y nombrado así por el asteroide Ceres (Chauvel, 2018).

Se caracteriza por ser un metal flexible, maleable y dúctil que fácilmente se oxida en presencia de aire (Habashi, 2013), su peso atómico es  $140.115 \text{ g mol}^{-1}$ , las valencias más comunes de este elemento son +3 y +4, se encuentra en la corteza terrestre y en aguas dulces a una concentración de 63 ppm y aproximadamente  $1 \times 10^{-6}$  ppm, respectivamente (Chauvel, 2018). En el suelo su concentración varía de 2 a 150 ppm y un promedio de 50 ppm (Trejo-Téllez *et al.*, 2016). Se encuentra en una variedad de minerales, que incluyen principalmente carbonatos, fosfatos, silicatos, óxidos e hidróxidos; no obstante, las principales fuentes de Ce industrial incluyen el mineral de carbonato bastnasita y el mineral de fosfato monacita (Dahle y Arai, 2015).

El Ce y el lantano (La) son los dos elementos de tierras raras que más se han utilizado en la agricultura con el objetivo de aumentar el rendimiento de los cultivos hortícolas (Tyler, 2004). Se ha informado que estos elementos pueden desencadenar hormesis un fenómeno de dosis-respuesta caracterizado por la estimulación de dosis bajas y la inhibición de dosis altas (Liu *et al.*, 2012; Agathokleous *et al.*, 2019). Entre las respuestas positivas del Ce, Liu *et al.* (2016b) informaron que la aplicación de  $0.5 \mu\text{M}$  Ce en pasto Bahía (*Paspalum notatum*), aumenta el área de superficie de la raíz. En maíz (*Zea mays*), el crecimiento de la raíz incrementa aproximadamente dos veces cuando se adiciona con  $0.63 \mu\text{M}$  Ce (Diatloff *et al.*, 1995). En lenteja de agua (*Lemna minor* L.) la tasa de crecimiento relativo aumenta con la aplicación Ce a dosis de 0.1 y 0.5 mM (Zicari *et al.*, 2018).

En espinaca (*Spinacia oleracea*) 15  $\mu\text{M}$  Ce adicionado a la solución nutritiva aumenta el área foliar de las plantas (Yuguan *et al.*, 2009); mientras que, en papa dulce (*Ipomoea batatas* L.) una concentración de cloruro de cerio de 10  $\text{mg L}^{-1}$  mejora ligeramente la resistencia a la oxidación (Jiang *et al.*, 2017).

En contraste a los beneficios, en plantas de ajo (*Allium sativum*), altas concentraciones de Ce ( $> 100 \mu\text{M}$ ) inhiben el crecimiento de la raíz y causan aberraciones cromosómicas en las células de la punta de la raíz (Xu *et al.*, 2016). En la planta acuática *Hydrilla verticillata*, dosis mayores a 50  $\mu\text{M}$  Ce reducen de manera drástica la concentración de clorofila y proteínas solubles, mientras que aumentan la de peróxido de hidrógeno (Wang *et al.*, 2007). La adición de Ce (50-500  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) en medio de cultivo, inhibe significativamente el alargamiento de las raíces primarias, disminuye el contenido de clorofila, el diámetro de la roseta y la biomasa fresca de *Arabidopsis thaliana* (Wang *et al.*, 2012). Altas concentraciones de Ce (20 a 80  $\text{mg L}^{-1}$ ) en plantas de papa dulce, afectan negativamente el desarrollo y la fotosíntesis, así como también desencadenan aumentos en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que llevó a un daño oxidativo seguido de peroxidación lipídica; además las altas concentraciones de Ce pueden alterar el equilibrio de  $\text{Ca}^{2+}$  citosólico a través del reemplazo de Ca por Ce y la inducción de ROS, lo que eventualmente provoca la inhibición del crecimiento de la raíz (Jiang *et al.*, 2017).

Autores como Zhang *et al.* (2013), Ramos *et al.* (2016), Xu *et al.* (2016) y García-Jiménez *et al.* (2017) han informado que, los efectos positivos o negativos que ejercen los REE en las plantas, son dependientes de la dosis, el tiempo de exposición, método de aplicación, la especie vegetal, las condiciones de crecimiento, pH, así como la interacción con nutrientes, etapa de desarrollo y los elementos de REE específicos utilizadas.

Por otro lado, las geófitas ornamentales juegan un importante papel en la industria de las flores a nivel mundial (Kamenetsky y Okubo, 2013), a este grupo pertenece los géneros de *Tulipa*, *Lilium*, *Narcissus*, *Gladiolus*, *Hyacinthus*, *Crocus* e *Iris*, que son utilizados principalmente para la producción comercial de flores de corte, plantas de maceta, material propagativo, así como en las áreas de paisajismo y jardinería (Benschop *et al.*, 2010; De Hertog *et al.*, 2013). El tulipán es la principal ornamental de bulbo producida en todo el mundo. Holanda tiene el 60% de la producción mundial. En los últimos años, las investigaciones realizadas en tulipán

se han centrado en aumentar el alargamiento de tallo, la calidad de bulbo y estimular la floración temprana (Kurtar y Ayan, 2005). Por lo que esta investigación tiene como objetivo estudiar el efecto del Ce en parámetros de crecimiento, desarrollo y contenido de algunas biomoléculas en plantas de tulipán cv. Jan van Nes.

### **1.3 MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **1.3.1 Material vegetal y condiciones del experimento**

El experimento se desarrolló bajo condiciones de invernadero con cubierta y malla sombra (monofilamente negro calibre 70%) en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México. La temperatura promedio que se registró durante el ciclo de cultivo fue 14 °C, 52% de humedad relativa y una intensidad lumínica de 125 lumens m<sup>-2</sup>.

Se emplearon bulbos comerciales de tulipán cultivar Jan van Nes (calibre 12+) importados de Holanda, que presenta un color amarillo intenso. La plantación se realizó en macetas de 7 pulgadas, como sustrato se empleó una mezcla de tezontle rojo, perlita (Agrolita<sup>MR</sup>) y turba (Promix<sup>®</sup> FLX) en una proporción 70:20:10 (v:v:v).

Antes de la plantación, los bulbos fueron previamente desinfectados, empleando el método de inmersión durante 15 min, en una solución compuesta por 2 g L<sup>-1</sup> de Ridomil Gold<sup>®</sup> Bravo SC [metalaxil-M (3.30%) + clorotalonil (33.00%)] y 1 g L<sup>-1</sup> de Captán<sup>®</sup> [N-triclorometiltio-4-ciclohexeno-1,2-dicarboximida (50%).

Para la fertilización se empleó la solución nutritiva Steiner (Steiner, 1984) al 50%, que contenía en g L<sup>-1</sup>: 0.5313 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 4H<sub>2</sub>O, 0.2464 MgSO<sub>4</sub> 7H<sub>2</sub>O, 0.0680 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0.1516 KNO<sub>3</sub> y 0.1306 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; misma que se complementó con la mezcla comercial de micronutrientes TradeCorp<sup>®</sup> AZ adicionando 0.0665 g L<sup>-1</sup> de solución nutritiva. El pH de la solución nutritiva fue ajustado a 5.3, utilizando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado. La solución nutritiva se suministró en el sistema de riego por goteo localizado empleando bombas de ½HP. El riego se programó con un temporizador digital (Steren, China), se aplicaron cuatro riegos al día con un volumen promedio de 80 mL cada uno.

### **1.3.2 Tratamiento y diseño experimental**

Se evaluaron diferentes concentraciones de Ce que fueron agregadas a la solución nutritiva. Los niveles de Ce empleados fueron 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  a partir de  $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; además de un testigo, sin aplicación de Ce.

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar (DECA), la unidad experimental consistió en una planta por maceta y cada tratamiento tuvo ocho repeticiones. La aplicación de los tratamientos se hizo desde el primer día de siembra de los bulbos.

### **1.3.3 Variables evaluadas**

#### **1.3.3.1 Parámetros de crecimiento y desarrollo**

Se evaluó la influencia del Ce en la brotación de bulbos, formación del botón floral, coloración de capullos, antesis y senescencia, estas variables fueron registradas en días después de plantación (ddp).

La brotación de bulbos se caracterizó con la aparición del meristemo apical. La coloración se definió cuando el botón floral presentó cambios en su coloración (tépalos verdes con un borde amarillo). La antesis se definió como los días en plena floración, la flor estaba completamente abierta y el gineceo mostraba los tres lóbulos del estigma y todos los estambres completamente formados. La planta se consideró senescente cuando la flor presentó marchitamiento y caída de tépalos.

La duración de la flor se estimó contabilizando los días desde la antesis hasta la senescencia.

Se determinó la altura de planta a los 15, 30, 40, 50 y 60 ddp midiendo desde la base del tallo hasta el ápice en crecimiento. A los 40, 50 y 60 ddp se midió la longitud de hoja del primer y segundo nudo. El diámetro de tallo se determinó a los 40 y 60 ddp empleando un vernier digital (Trupper). La longitud del botón floral se determinó a los 50 y 60 ddp.

Al finalizar el ciclo del cultivo las plantas se fraccionaron por órganos (bulbo, tallo, hoja, y flor) con el fin obtener el peso de la biomasa fresca y seca. Cada órgano se pesó en una balanza analítica (Adventurer™ Pro, Ohaus, USA), finalmente para la determinación del peso de la biomasa seca, las muestras de cada órgano fueron colocadas en una estufa de circulación de aire forzado (Riossa HCF-125, México) por 72 h con una temperatura de 72 °C.

### 1.3.3.2 Azúcares solubles totales

La cuantificación los azúcares solubles totales se realizó en hojas y flores senescentes que fueron recolectadas al final del ciclo del cultivo (60 ddp). Se pesaron 1,000 mg de hoja y 250 mg de flor, el tejido fue previamente molido en nitrógeno líquido. Se empleó el método descrito por [Bailey \(1958\)](#) con antrona, ácido sulfúrico y alcohol al 80%. Para cuantificar los azúcares totales, se realizó una curva estándar usando glucosa (Sigma-Aldrich; Saint Louis, MO, EE. UU.). Se midió en una absorbancia de 600 nm en un espectrofotómetro (Genesys™ 10S ThermoFisher Scientific; Waltham, MA, EE. UU.).

### 1.3.3.3 Prolina libre total

La prolina libre total se determinó en hojas y flores senescentes de tulipán al finalizar el ciclo del cultivo (60 ddp). Se empleó el método descrito por [Bates et al. \(1973\)](#), en el cual se utilizaron 500 mg de hojas y 200 mg de flores previamente molidos en nitrógeno líquido. Luego se realizó una primera extracción macerando las muestras con 5 mL de ácido sulfosalicílico al 3%, y filtrando la muestra con papel de filtro Whatman No. 4. Posteriormente, se mezclaron 2 mL de solución de ninhidrina (2.5% p/v contenido en la solución de 60% de ácido acético concentrado y 40% de ácido fosfórico 6 M), más 2 mL de ácido acético glacial concentrado y 2 mL del extracto de cada muestra. La mezcla se incubó en baño María a 95 °C durante 40 min. La reacción se detuvo colocando las muestras en hielo. Después de la reacción, se añadieron 4 mL de tolueno a cada muestra, se mezclaron brevemente en un vórtex y se incubaron a temperatura ambiente durante 15 min. Para la cuantificación de la prolina, se construyó una curva estándar usando L-prolina (400 nM mL<sup>-1</sup>) y la absorbancia correspondiente se midió a 520 nm en un espectrofotómetro (Genesys™ 10S ThermoFisher Scientific; Waltham, MA, EE. UU.).

### 1.3.3.4 Clorofilas a, b, total y carotenoides

La cuantificación de clorofila se realizó en hojas senescentes de tulipán recolectadas al final del ciclo del cultivo (60 ddp) por el método de [Sumanta et al. \(2014\)](#). La extracción se realizó con acetona al 80%. La absorbancia se midió a 470 nm, 646.8 nm y 663.2 nm en un espectrofotómetro (Genesys™ 10S ThermoFisher Scientific; Waltham, MA, EE. UU.) y las concentraciones se estimaron usando las siguientes fórmulas: Clorofila a (Ch a; µg mL<sup>-1</sup>) = 12.25(A<sub>663.2</sub>) - 2.79 (A<sub>646.8</sub>); Clorofila b (Ch b; µg mL<sup>-1</sup>) = 21.50(A<sub>646.8</sub>) - 5.10 (A<sub>663.2</sub>); Clorofila total (Ch tot ; µg

$\text{mL}^{-1}) = \text{Ch } a + \text{Ch } b = \text{Carotenoides totales (Car; } \mu\text{g mL}^{-1}) = 1000 (A_{470} - 1.82 \text{ Ch } a - 85.02 \text{ Ch } b) / 198.$

### 1.3.4 Análisis estadístico

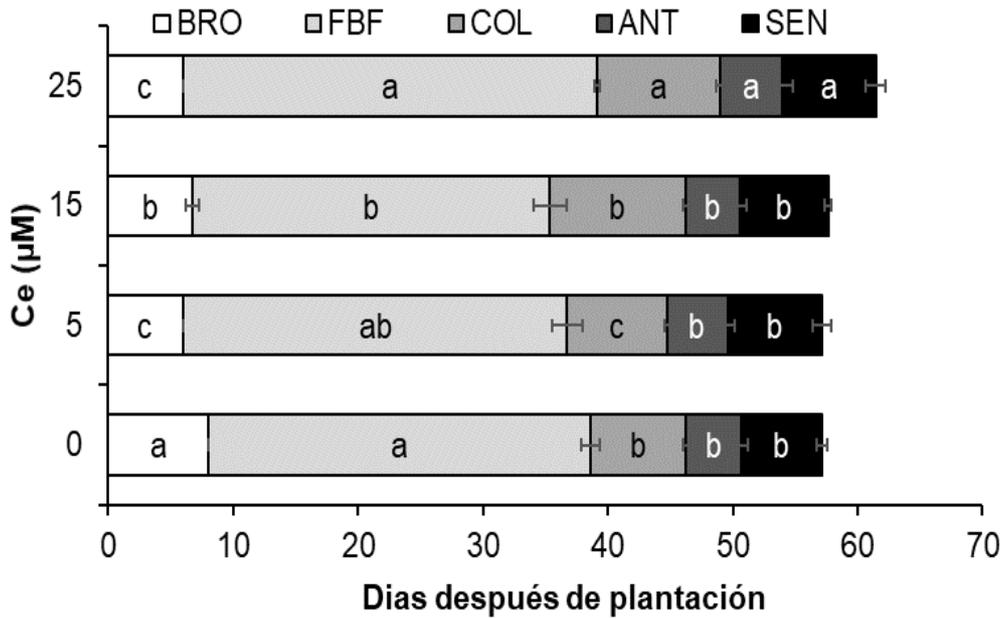
Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y las medias fueron comparadas con la prueba de Tukey con una significancia de  $\alpha=0.05$ . Se empleó el sistema de análisis estadístico SAS versión 9.4 ([SAS Institute, 2013](#)).

## 1.4 RESULTADOS

### 1.4.1 Parámetros de crecimiento y desarrollo

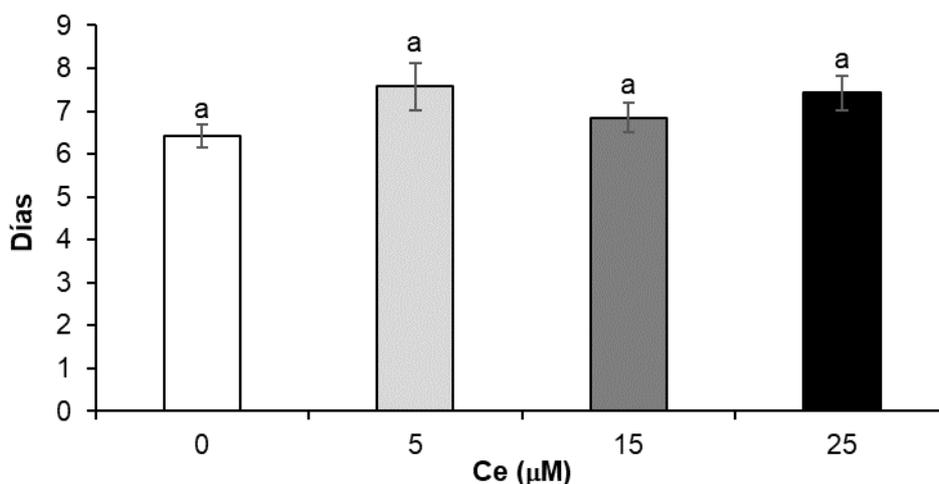
El ciclo de cultivo de las plantas de tulipán se prolongó en promedio 4.28 días con la adición de 25  $\mu\text{M}$  Ce en la solución nutritiva. comparado con las plantas testigo que completaron su ciclo en 57.14 días; en tanto que, las demás concentraciones tuvieron una duración similar al testigo (**Figura 2.1**).

La brotación de bulbos se estimuló con la adición de las diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva, ocurriendo en promedio 6 ddp; mientras que, en plantas testigo sin adición de Ce, la aparición del meristemo apical ocurrió 2 días después (8 ddp). Asimismo, la formación del botón floral se adelantó en 1.85 y 3.25 días en plantas tratadas con 5 y 15  $\mu\text{M}$  Ce respectivamente, en comparación con el testigo donde este evento ocurrió 38.62 ddp. En contraste, la dosis 25  $\mu\text{M}$  Ce retrasó la formación del botón floral en 0.5 días, también respecto al testigo. Plantas tratadas con 5  $\mu\text{M}$  Ce, presentaron la coloración del botón en menor tiempo (44.75 ddp) comparado con el testigo (46.25 ddp); en consecuencia, el periodo de antesis se observó 1.14 días antes que en las plantas testigo (50.71 ddp). En tanto que, en las plantas que estuvieron expuestas a 25  $\mu\text{M}$  Ce, se retrasó la coloración del botón floral (2.75 días) y la antesis (3.29 días) en comparación con las plantas testigo. En plantas tratadas con Ce, el periodo de tiempo para alcanzar la senescencia no fue diferente a testigo, excepto en las plantas tratadas con 25  $\mu\text{M}$  Ce, donde el periodo para alcanzar la senescencia se prolongó en promedio en 4.28 días que en plantas testigo (57.14 ddp) (**Figura 2.1**).



**Figura 2.1.** Brotación de bulbo (BROT), formación del botón floral (FBF), coloración de capullos (COL), antesis (ANT) y senescencia (SEN) en plantas de tulipán tratados con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada barra del mismo color, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .

La duración de la flor se estimó contabilizando los días desde el periodo de antesis hasta la senescencia de la flor, es decir, cuando se presentó el marchitamiento y caída de tépalos. Las dosis de Ce de 5 y 25  $\mu\text{M}$  alargaron la vida de la flor en 1.15 y 1.05 días respectivamente en comparación al testigo donde la vida de la flor fue de 6.42 días, aunque estos aumentos no fueron estadísticamente significativos (**Figura 2.2**).

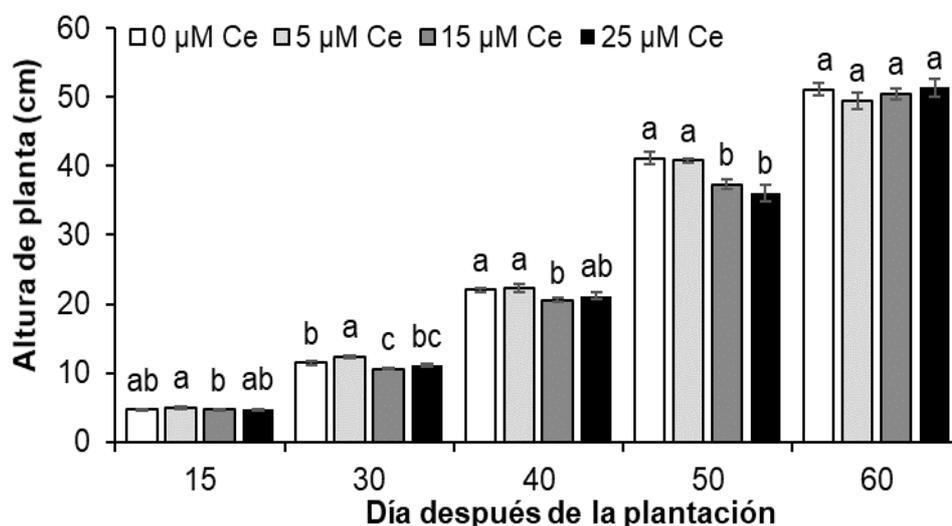


**Figura 2.2.** Duración de la flor en plantas de tulipán tratados con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada barra, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .

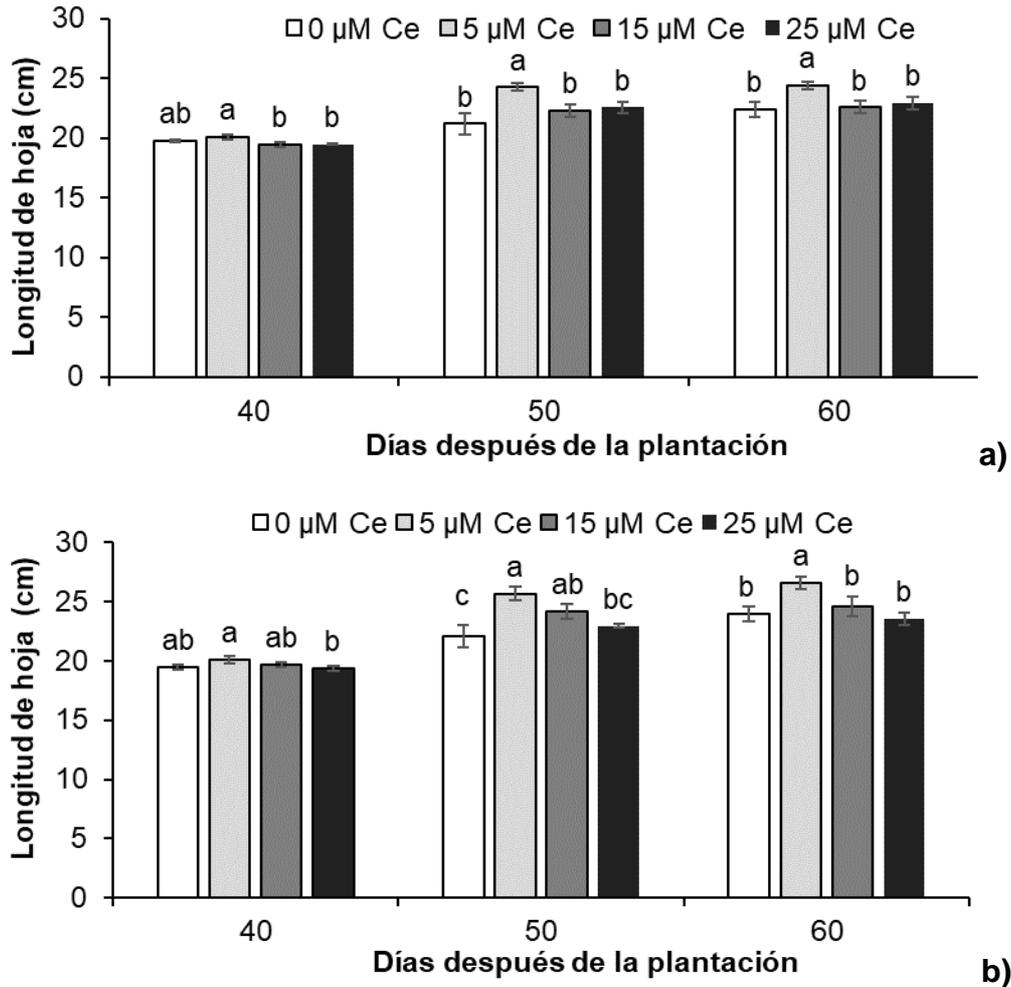
En lo que respecta a la altura de planta, 15 ddp las plantas tratadas con 5  $\mu\text{M}$  Ce tuvieron un aumento en este variable de 6% en comparación al testigo, pero no fue significativo. A los 30 ddp, la dosis 5  $\mu\text{M}$  Ce incrementó de manera significativa la altura de planta, registrando un incremento de 7.68% respecto al testigo. A los 30 ddp, la dosis 15  $\mu\text{M}$  Ce incrementaron la altura de planta en 7.42% respecto al testigo. En la evaluación realizada 40 ddp, el tratamiento 15  $\mu\text{M}$  Ce redujo la altura de planta en 6.52%, respecto al testigo. De la misma manera, dosis de 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce redujeron en 9.23 y 12.31% la altura de planta después de 50 d de la plantación, en comparación con el testigo. En la última evaluación (60 ddp), no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados (**Figura 2.3**).

La longitud de las hojas del primer y segundo nudo aumentó significativamente en plantas tratadas con 5  $\mu\text{M}$  Ce respecto al testigo en todas las evaluaciones (**Figura 2.4**). La longitud de la hoja del primer nudo a los 40, 50 y 60 ddp tuvieron aumentos de 1.46, 14.50 y 8.97% respectivamente, en plantas tratadas con 5  $\mu\text{M}$  Ce en comparación con el testigo. Resultados opuestos se observaron con las concentraciones 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, las cuales provocaron una ligera disminución de esta variable en 1.67 y 1.46% respectivamente a los 40 ddp; mientras que, a los 50 y 60 ddp estos tratamientos no mostraron ser estadísticamente diferentes al testigo (**Figura 2.4a**).

A los 40 ddp, la longitud de hoja del segundo nudo en plantas tratadas con 5  $\mu\text{M}$  Ce aumentó en 3.07% en comparación al testigo; en contraste, en plantas tratadas con 25  $\mu\text{M}$  Ce se redujo el valor de esta variable en menos del 1% (**Figura 2.4b**). A los 50 ddp, la menor longitud de la hoja del segundo nudo se registró en las plantas testigo; en tanto que, todas las concentraciones de Ce incrementaron de manera significativa el valor de esta variable, la dosis 5  $\mu\text{M}$  Ce tuvo el mayor incremento superando al testigo en 16.23%. Asimismo, la dosis 5  $\mu\text{M}$  Ce a los 60 ddp, aumentó de manera significativa la longitud de la segunda hoja en 10.83% respecto al testigo. El resto de los tratamientos con Ce tuvieron un comportamiento similar al testigo.



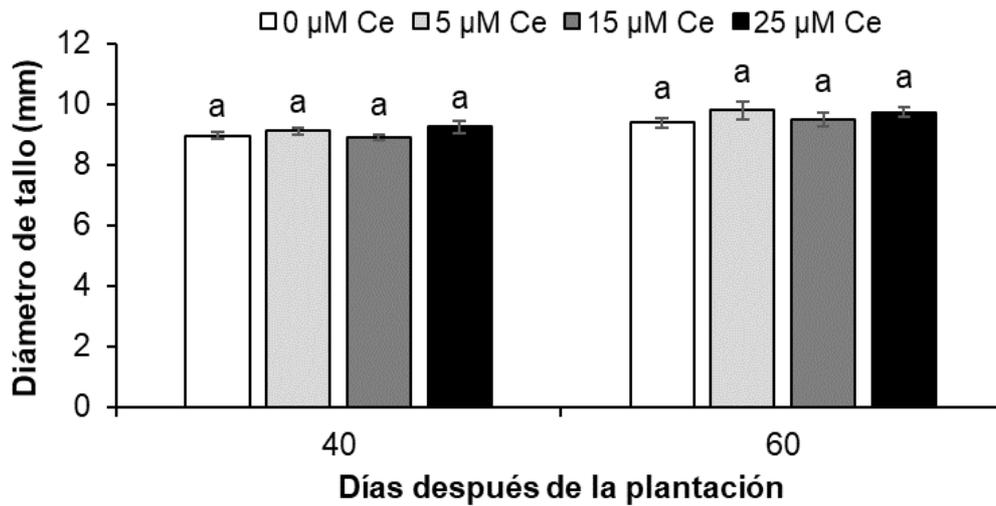
**Figura 2.3** Altura de plantas de tulipán 15, 30, 40, 50 y 60 días después de la plantación, tratadas con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .



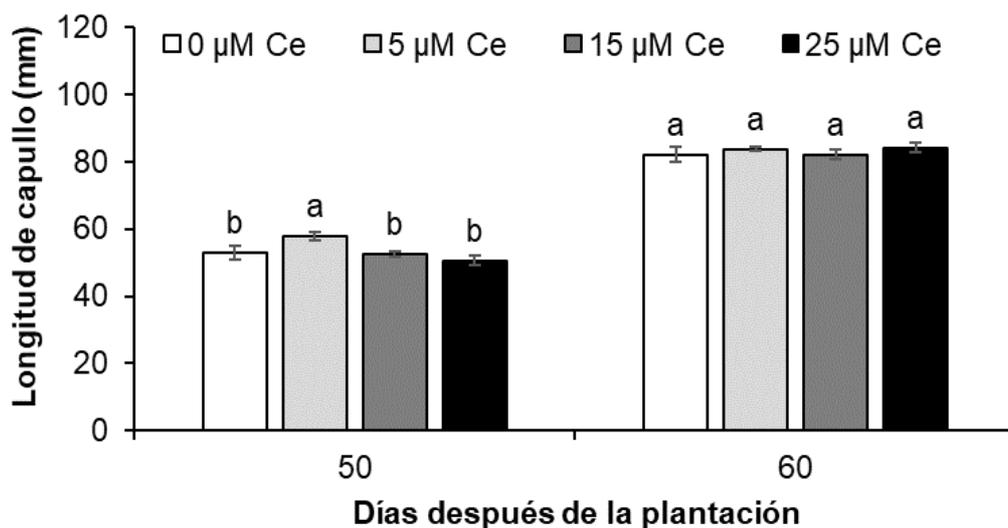
**Figura 2.4** Longitud de hoja del primer (a) y segundo nudo (b) en plantas de tulipán después de 40, 50 y 60 días de la plantación, tratadas con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .

El diámetro de tallo no presento diferencias significativas entre tratamientos en ninguna de las dos evaluaciones realizadas (40 y 60 ddp) (**Figura 2.5**).

A los 50 días después de plantación, la mayor longitud de capullo se obtuvo en plantas tratadas con 5  $\mu$ M Ce, superando al testigo en 9.14%; en tanto que, los demás tratamientos con Ce se comportaron de manera similar al testigo. A los 60 ddp, las diferentes concentraciones de Ce no tuvieron un efecto significativo en la longitud de capullo (**Figura 2.6**).



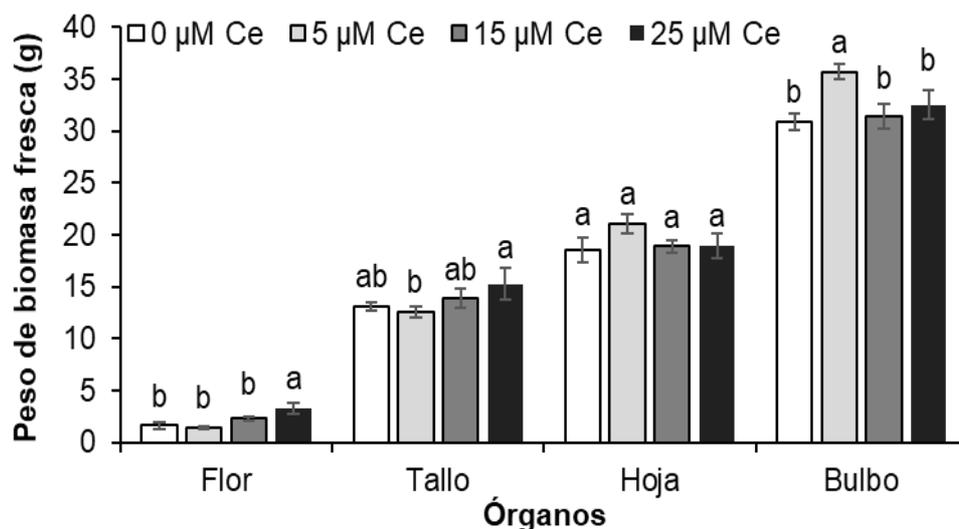
**Figura 2.5.** Diámetro de tallo basal después de 40 y 60 de la plantación en plantas de tulipán tratadas con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .



**Figura 2.6.** Longitud de capullo floral después de 50 y 60 de la plantación en plantas de tulipán tratadas con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .

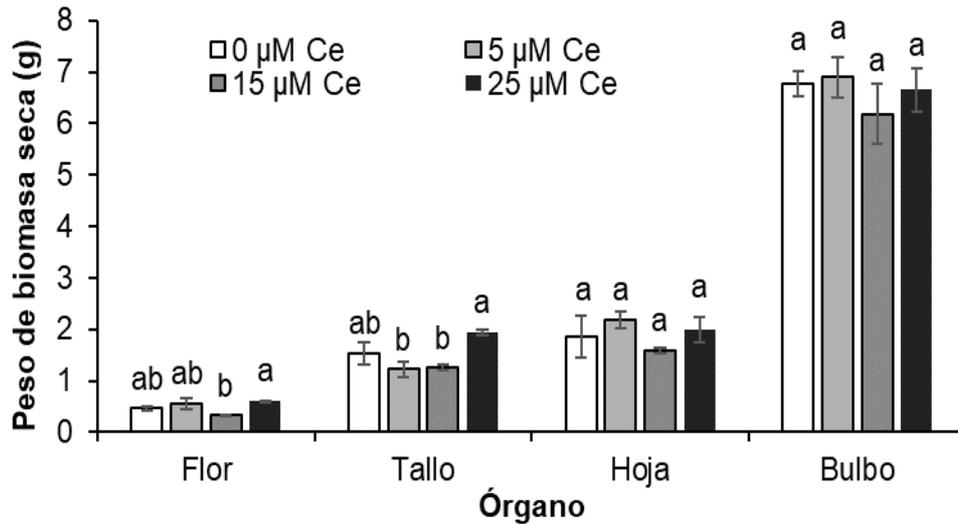
Las diferentes concentraciones de Ce tuvieron efecto significativo en el peso de la biomasa fresca y seca en los distintos órganos de tulipán (**Figuras 2.7 y 2.8**). El peso de la biomasa fresca de la flor fue significativamente mayor en las plantas tratadas con altas concentraciones de Ce (25  $\mu\text{M}$ ), registrando incrementos de

101.21% respecto al testigo. En tallo, los pesos de biomasa fresca no fueron diferentes en los tratamientos con Ce respecto al testigo. En hojas no se registraron diferencias entre tratamientos. En bulbos, solo las plantas tratadas con 5  $\mu\text{M}$  Ce, tuvieron un incremento en el peso de la biomasa fresca de 15.66% respecto al testigo (**Figura 2.7**).



**Figura 2.7.** Peso de biomasa fresca en diferentes órganos de plantas de tulipán tratadas con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva, al final del ciclo del cultivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .

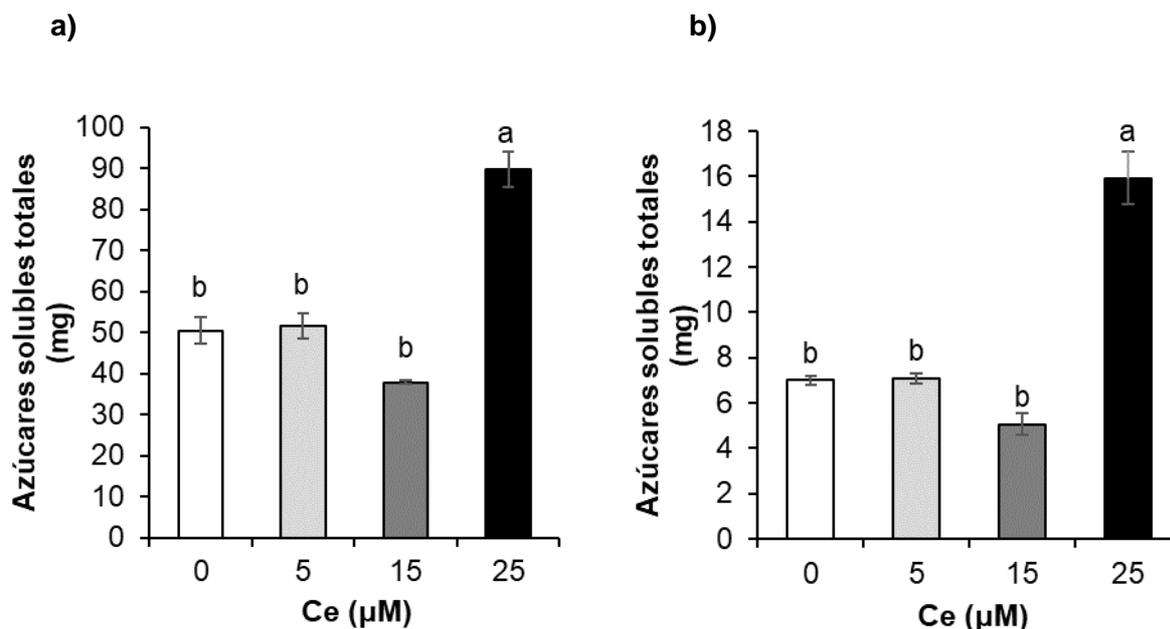
Una dosis de 25  $\mu\text{M}$  Ce resultó favorable en el peso de la biomasa seca de las flores de tulipán, incrementando en 27.45% el valor de esta variable respecto al testigo. En tallo, las dosis de Ce evaluadas no ocasionaron cambios significativos en la biomasa seca respecto al testigo. La adición de las diferentes concentraciones de Ce a la solución nutritiva, no tuvieron efecto significativo en el peso de la biomasa seca de hoja y bulbo (**Figura 2.8**).



**Figura 2.8.** Peso de biomasa seca en diferentes órganos de plantas de tulipán tratadas con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva, al final del ciclo del cultivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .

#### 1.4.2 Azúcares solubles totales

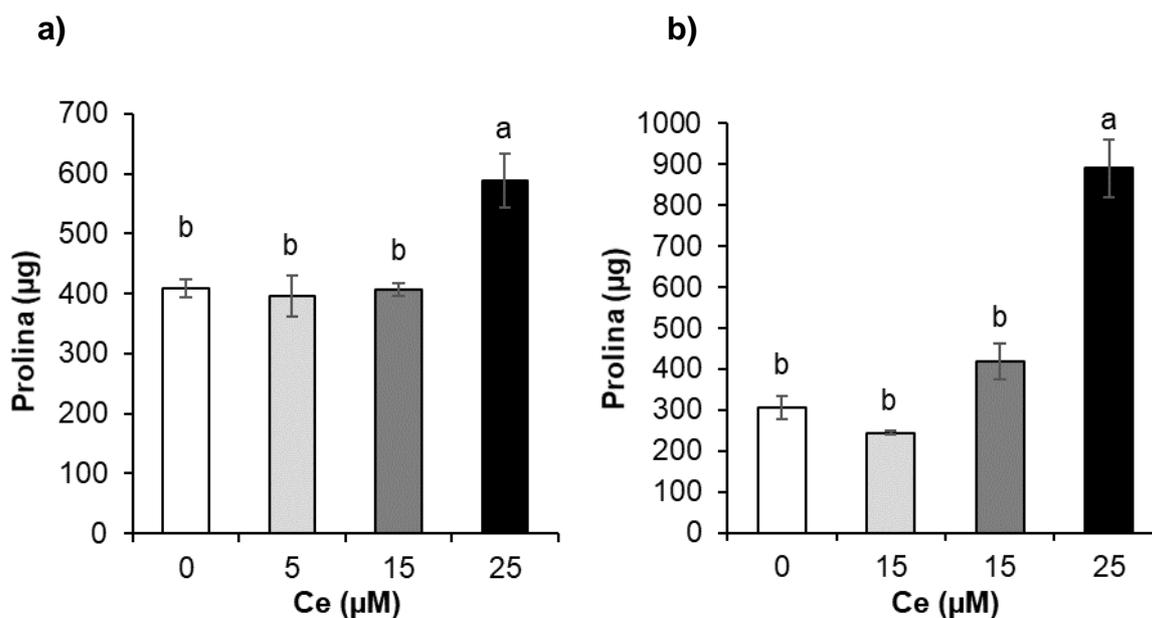
El contenido de azúcares solubles totales en hojas y flores de tulipán evaluados al final del ciclo del cultivo de tulipán fue mayor en plantas tratadas con 25  $\mu\text{M}$  Ce, registrándose aumentos de 77.70% en hojas y de 25.02% en flor en comparación al testigo. En tanto que, los demás tratamientos no fueron estadísticamente diferentes, aunque resulta interesante observar que, plantas tratadas con 15  $\mu\text{M}$  Ce obtuvieron el menor contenido de azúcares solubles totales en los dos órganos (**Figura 2.9**).



**Figura 2.9.** Contenido de azúcares totales en hojas (a) y flores (b) de tulipán al final del ciclo productivo tratados con diferentes concentraciones de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

#### 1.4.3 Prolina libre total

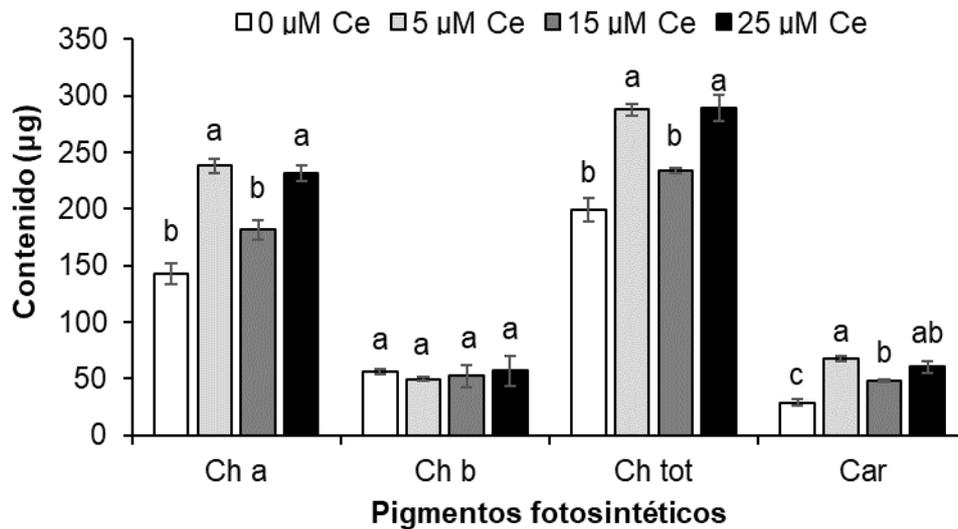
El contenido de prolina aumentó de manera considerable tanto en hoja como en flor cuando las plantas fueron expuestas a la mayor concentración de Ce (25 μM), superando al testigo en 44.02% en hojas y en 192.26% en flor; mientras que, los demás tratamientos no presentaron diferencias significativas. Por otra parte, con el tratamiento 5 μM Ce en flor, el valor de esta variable decreció respecto al testigo, sin ser estadísticamente significativo (**Figura 2.10**).



**Figura 2.10.** Contenido de prolina en hojas (a) y flores (b) tulipán al final del ciclo productivo tratados con diferentes concentraciones de Ce vía solución nutritiva. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

#### 1.4.4 Clorofilas a, b, total y carotenoides

Las concentraciones 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce adicionadas en la solución nutritiva aumentaron el contenido de clorofila a, total y carotenoides en hojas al final del ciclo productivo en 66.73 y 62.28%, en 44.45 y 45.11%, y en 133.50 y 112.79%, respectivamente, en comparación con el testigo. Asimismo, la dosis 15  $\mu\text{M}$  Ce también ocasionó un aumento significativo en el contenido de carotenoides con incrementos de 67.07%, respecto al testigo. En el contenido de clorofila b no existieron diferencias entre tratamientos (**Figura 2.11**).



**Figura 2.11** Contenido de clorofilas *a*, *b*, total y carotenoides en hojas de tulipán al final del ciclo productivo tratados con diferentes concentraciones de Ce vía solución nutritiva. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

## 1.5 DISCUSIÓN

El Ce es categorizado como un elemento benéfico y perteneciente al grupo de los elementos de tierras raras, sus efectos beneficiosos a bajas concentraciones y negativos a altas concentraciones, en parámetros de crecimiento, desarrollo, reproductivo, bioquímicos y nutricionales en plantas superiores han sido reportados en la literatura (He y Loh, 2000; Wang *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2016). Recientemente, autores como Gómez-Merino y Trejo-Téllez (2018) consideran que los elementos benéficos están surgiendo como bioestimulantes puesto que mejoran el crecimiento y calidad de los cultivos.

En la presente investigación, la aplicación de las diferentes dosis Ce en la solución nutritiva estimuló la brotación de los bulbos, adelantando este proceso 2 días en comparación con el testigo (8 ddp); no obstante, solo la dosis baja de Ce (5  $\mu$ M) afectó de manera positiva la formación del botón floral, por consiguiente, promovió la coloración y floración temprana en tulipán, aunque, el periodo de tiempo para alcanzar la senescencia fue igual al de las plantas testigo (Figura 2.1). Resultados contrastantes se obtuvieron en las plantas tratadas con 25 de  $\mu$ M Ce, donde todas las fases evaluadas se retrasaron respecto al testigo y el periodo para alcanzar la senescencia fue más prolongado. La razón por la cual la dosis baja de Ce estimula

la brotación de los bulbos y adelanta el periodo de floración probablemente sea que el Ce está relacionado con alguna fitohormona que favorece estos procesos.

El momento de transición del crecimiento vegetativo a la floración es importante en la agricultura. La floración está regulada por una compleja red de genes que integran múltiples señales ambientales y señales endógenas para que la floración ocurra en el momento adecuado; la regulación hormonal, la señalización y la homeostasis son muy importantes en este proceso (Galvão y Schmid, 2014; Campos-Rivero *et al.*, 2017). En tulipán, las hormonas vegetales endógenas que están relacionadas directamente con la brotación de bulbo y la floración son las giberelinas (Cocozza-Talia y Stellacci, 1979). En diversos estudios se ha presentado que la producción de fitohormonas se puede ver afectada por la presencia de REE; en algunos casos, los REE pueden actuar sinérgicamente con algunas fitohormonas que pueden estimular la germinación y la floración (He y Loh, 2002; Wang *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015; Ramos *et al.*, 2016). Pese a lo anterior, aún no está completamente elucidado si los REE están directamente involucrados con la señalización de las hormonas vegetales; asimismo, las respuestas de estímulo o de inhibición de las fitohormonas son variables entre las especies y entre los diferentes REE (Wang *et al.*, 2015). En plantas de *Arabidopsis*, La interactúa con la señal de ácido abscísico (ABA) en el crecimiento de la raíz, además una concentración de 10  $\mu\text{mol La}^{3+} \text{L}^{-1}$  aumenta la tasa de germinación de semilla cuando estas son inhibidas por ABA (Wang *et al.*, 2014). En plantas de *Dendrobium densiflorum*, la aplicación de 5  $\mu\text{mol Nd}^{3+} \text{L}^{-1}$ , aumentó significativamente el nivel de ácido indol-3-acético endógeno (IAA) y la relación de IAA y citoquininas durante el proceso de formación del primordio de la raíz, lo que favoreció el enraizamiento de los esquejes (Luo *et al.*, 2008). En *Arabidopsis thaliana*, bajas concentraciones de Ce (0.5-10.0  $\mu\text{M}$ ) estimularon de manera significativa la floración y el número de flores por planta, por lo que se consideró que el Ce u otros elementos de las tierras raras pueden tener un potencial para desarrollarse como agentes promotores de la floración no hormonales para ciertas especies de cultivos (He y Loh, 2000). Años más tarde, He y Loh (2002) señalaron que dichas respuestas estuvieron relacionadas con la mayor producción de citoquininas endógenas en la planta, por lo que sugirieron que los REE tienen un efecto sinérgico con esta fitohormona.

Por otro lado, la duración de la flor en maceta se prolongó 1.15 y 1.05 días con dosis de Ce de 5 y 25  $\mu\text{M}$  respectivamente, en comparación al testigo (6.42 días),

aunque estos aumentos no fueron estadísticamente significativos (**Figura 2.2**). Solo la concentración de 5  $\mu\text{M}$  Ce aumentó la altura de planta en los primeros 40 ddp, pero no tuvo efecto en las demás evaluaciones; en tanto que, 15  $\mu\text{M}$  Ce redujo la altura de planta (**Figura 2.3**). Estos resultados indican que los efectos positivos del Ce son dependientes de la fase fenológica de la planta, tal como lo reportan [García-Jiménez et al. \(2017\)](#) al estudiar en pimiento (*Capsicum annuum* L.) el efecto del lantano, otro elemento de las tierras raras. La dosis baja de Ce (5  $\mu\text{M}$ ) también aumentó la longitud de las hojas tanto del primero como del segundo nudo en todas las evaluaciones (**Figura 2.4**); resultados opuestos se observaron con las concentraciones 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce que provocaron una ligera disminución a los 40 ddp en la longitud de la hoja del primer nudo (**Figura 2.4a**); asimismo, la dosis 25  $\mu\text{M}$  Ce redujo la longitud de la hoja del segundo nudo (**Figura 2.4b**). Por otra parte, las diferentes concentraciones de Ce no tuvieron efecto en el diámetro de tallo (**Figura 2.5**). Las plantas que estuvieron expuestas a 5  $\mu\text{M}$  Ce tuvieron la mayor longitud de capullo (57.88 mm), superando al testigo en 9.14% a 50 ddp; mientras que, a los 60 ddp los tratamientos no presentan diferencias significativas (**Figura 2.6**).

Bajo las condiciones experimentales del presente estudio, el efecto del Ce en parámetros de crecimiento, desarrollo y reproductivo de tulipán mostró un fenómeno de dosis-respuestas caracterizado por la estimulación de dosis bajas y la inhibición con dosis altas conocido como hormesis ([Agathokleous et al., 2019](#)). Esta respuesta bifásica se demostró con la brotación y floración temprana, la duración de la flor, el aumento de la altura de planta, las longitudes de las hojas del primer y segundo nudo y la longitud de capullo. La concentración alta de Ce (25  $\mu\text{M}$ ) retrasó la fase reproductiva, mientras que 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce redujeron la altura de planta y longitud de hoja del primer y segundo nudo. Estos resultados evidencian el potencial que tiene Ce para utilizarse como un bioestimulante a bajas dosis en ornamentales.

Los efectos positivos que causa el Ce en los parámetros de crecimiento y desarrollo también han sido informados por [Wang et al. \(2012\)](#) en plantas de *Arabidopsis thaliana* cultivadas en medios de cultivo, donde la concentración de Ce que osciló entre 0.5 y 1  $\mu\text{mol L}^{-1}$  estimuló el crecimiento de las plantas, aumentó el diámetro de rosetas y la biomasa fresca. En pepino (*Cucumis sativus*) la longitud del tallo aumentó aproximadamente un 100% en comparación con las plantas testigo con la adición de 2000  $\text{mg L}^{-1}$  de nanopartículas de  $\text{CeO}_2$  ([López-Moreno et al., 2010](#)).

Asimismo, dosis de cloruro de cerio de 10  $\mu\text{M}$  mejoró el crecimiento en plántulas de arroz (*Oryza sativa*), aumentado el peso y la altura de la planta cuando éstas se encontraban expuestas a toxicidad por cadmio (Wu *et al.*, 2014). En tanto que, una concentración de 25  $\mu\text{M}$  Ce, en arroz aumentó la altura de planta, el número de macollos, longitud de raíz y volumen de raíz en plantas de 26 días de edad (Ramírez-Olvera *et al.*, 2018). Por otra parte, Espindola *et al.* (2013), documenta que, la aplicación de Ce en las semillas aumenta la germinación y el vigor de las semillas de maíz (*Zea mays*), pero no influye en el crecimiento vegetativo y reproductivo.

El peso de la biomasa fresca de la flor fue significativamente mayor en las plantas tratadas con altas concentraciones de Ce (25  $\mu\text{M}$ ), con incrementos del 101.21% respecto al testigo; mientras que, la dosis baja de Ce redujo el peso de biomasa fresca de tallo en 4.32%, pero aumentó la de bulbo en 15.66%. El peso de la biomasa fresca de hojas no se vio influenciado por los tratamientos evaluados (Figura 2.7). Se han reportado incrementos en la biomasa ocasionados por el Ce, mismos que se han relacionado con el incremento de los procesos fotosintéticos (Wu *et al.*, 2014).

Por otra parte, el Ce solo afectó significativamente el peso de la biomasa seca de flores y tallos con la dosis 25  $\mu\text{M}$ , ocasionando incrementos de 32.60 y 27.45%, respectivamente, en comparación con el testigo. La dosis 15  $\mu\text{M}$  Ce redujo el peso de la biomasa seca de flor en 28.26%; mientras que, las dosis 5 y 15  $\mu\text{M}$  Ce redujeron la biomasa seca de tallo en 20.26 y 18.30%. respectivamente (Figura 2.8).

Los aumentos en biomasa fresca ocasionados por el Ce (Figura 2.7), se asocian con los incrementos en el contenido de pigmentos fotosintéticos registrados en plantas tratadas con 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce (Figura 2.11). Estos resultados son congruentes con lo reportado por Ma *et al.* (2014), quienes al realizar aplicaciones foliares de tetracloruro de cerio (100 mg L<sup>-1</sup>), documentan que el Ce promueve el aumento del peso de la materia fresca y seca en plantas de col china (*Brassica chinensis* L.) cosechadas a los 28 días de edad. Liu *et al.* (2016a) reportan resultados similares en espiguilla o pasto azul de Kentucky (*Poa pratensis*), al someter a las plantas a un pretratamiento con 30  $\mu\text{M}$  Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> durante 24 h, obtuvieron aumentos en pesos fresco y seco de la planta cuando éstas se encontraban bajo estrés por Cu; mientras

que, en *A. thaliana*, concentraciones que oscilaron de 0.5 a 2.5  $\mu\text{M}$   $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  aumentaron de manera significativa el peso de la biomasa seca (He y Loh, 2000).

El Ce en dosis alta (25  $\mu\text{M}$ ) también mostró incrementar de forma significativa el contenido de azúcares solubles totales en hojas y flores de tulipán evaluados al final del ciclo del cultivo, con aumentos de 77.70% y 25.02% respectivamente, en comparación al testigo (**Figura 2.9**). Si bien, no existieron diferencias significativas en los contenidos de azúcares en hoja y flor entre el testigo y el tratamiento 15  $\mu\text{M}$  Ce, se observa que esta última registra causa reducción en esta variable; el hecho de que la dosis 15  $\mu\text{M}$  Ce redujera el contenido de azúcares solubles para después incrementar con la dosis más alta de Ce, es probable que sea una respuesta de adaptación por algún efecto tóxico leve que pudiera estar causando el Ce en las plantas de tulipán. En plantas de col china, aplicaciones foliares de Ce (100  $\text{mg L}^{-1}$ ) aumentan de forma significativa el contenido de azúcares solubles totales (Ma *et al.*, 2014), estos efectos son respaldados por Li *et al.* (2013) quienes al realizar aplicaciones foliares en lechuga (*Lactuca sativa*) de  $\text{CeO}_2$  en dosis de 0.05, 0.10 y 0.20  $\text{g kg}^{-1}$ , reportan un aumento significativo en la concentración de azúcares solubles totales en 25, 33 y 25% respectivamente, comparado al testigo. Yuanyuan *et al.* (2009) mencionan que los azúcares solubles juegan un papel importante en la aclimatación de las plantas bajo estrés por frío, ejerciendo efectos positivos para proteger a las células de los daños ocasionados, a través de mecanismos que incluyen funciones como osmoprotectores, nutrimentos y de interacción con la bicapa lipídica; además de cumplir un papel como mensajeros primarios en la traducción de señales. Sin embargo, se requieren estudios especializados para entender por qué el Ce aumenta el contenido de azúcares solubles totales.

El contenido de prolina aumentó de manera considerable tanto en hoja como en flor cuando las plantas fueron expuestas a la mayor concentración de Ce (25  $\mu\text{M}$ ), superando al testigo en 44.02 y 192.26%, respectivamente (**Figura 2.10**). Estos resultados pudieran estar relacionados, al menos de manera parcial, con que la dosis alta de Ce evaluada estuviera causando algún tipo de estrés abiótico o toxicidad leve, y, por tanto, la acumulación de prolina sería una estrategia de respuesta de la planta. Lo anterior también podría explicar el retraso en la floración y los efectos negativos en algunos parámetros de crecimiento que tuvieron las concentraciones 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce. Wang *et al.* (2007) menciona que el incremento de prolina en la planta acuática *Hydrilla verticillata*, se debe a una respuesta de

estrategia adaptativa por la toxicidad de altas concentraciones de Ce ( $> 30 \mu\text{M}$ ). El incremento de prolina también fue informado por [Mao et al. \(2012\)](#) quienes señalan que una dosis  $20 \text{ mg Ce}^{3+} \text{ L}^{-1}$  aumenta la concentración de este aminoácido en 12.9% respecto al testigo en plantas de soya. Por otra parte, [Wang et al. \(2019\)](#) respaldan la idea de que la prolina funciona como una señal para las plantas cuando se encuentran bajo estrés y muestra una tendencia al alza en la mayoría de las condiciones bióticas. La prolina juega un papel importante en la protección de las moléculas de proteínas y en la regulación de la presión osmótica de las células. También mantiene la actividad fotosintética y actúa eliminando las especies reactivas de oxígeno ([Hayat et al., 2012](#)).

Todas las concentraciones de Ce adicionadas en la solución nutritiva aumentaron el contenido de clorofila *a*, total y carotenoides en hojas evaluadas al final del ciclo productivo, pero los incrementos significativos se registraron con las concentraciones de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, mientras que el contenido de clorofila *b* no presenta diferencia significativa con la aplicación de Ce (**Figura 2.11**). Por lo que se sugiere que dosis bajas de Ce ( $< 25 \mu\text{M}$ ), aumentan el contenido los pigmentos fotosintéticos en tulipán. Resultados similares fueron reportados en plantas de ajo, donde la concentración de clorofila en hoja fue significativamente mayor, cuando las plantas se trataron a bajas dosis de Ce (IV) en forma nitrato de amonio cérico (0.4 y 4  $\mu\text{M}$ ); mientras que, concentraciones altas (40 y 100  $\mu\text{M}$ ) tuvieron un efecto contrario ([Xu et al., 2016](#)). Por otro lado, en hojas de *Arabidopsis thaliana*, dosis mayores a 50  $\mu\text{mol Ce L}^{-1}$ , redujeron significativamente la concentración de clorofila ([Wang et al., 2012](#)).

## 1.6 CONCLUSIÓN

Se concluye que la aplicación de 5  $\mu\text{M}$  Ce tiene un efecto positivo en los parámetros de crecimiento, desarrollo y reproductivo del tulipán, al estimular la brotación de bulbo, la formación del botón floral, la coloración y adelantar el periodo de floración; asimismo, incrementa la longitud de hojas del primer y segundo nudo, así como la longitud del botón floral y la altura de planta dependiendo la etapa de desarrollo, por lo que se puede decir que mejora la calidad de este cultivo. Además, el Ce presenta un efecto benéfico en el contenido de biomoléculas como azúcares solubles totales, prolina, y pigmentos fotosintéticos. Por otra parte, la dosis alta de Ce evaluada (25

µM) tiene efectos negativos, por lo que se evidencia su efecto hormético de este elemento.

## 1.7 LITERATURA CITADA

- Agathokleous E, Kitao M, Calabrese EJ. 2019. Hormetic dose responses induced by lanthanum in plants. *Environmental Pollution* 244: 332-341. doi: 10.1016/j.envpol.2018.10.007
- Bailey RW. 1958. The reaction of pentoses with anthrone. *Biochemical Journal* 68(4): 669-672. doi: 10.1042/bj0680669
- Bates LS, Waldren RP, Teare ID. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39: 205-207. doi: 10.1007/BF00018060
- Benschop M, Kamenetsky R, Le Nard M, Okubo H, De Hertogh A. 2010. The global flower industry: production, utilization, research. *Horticultural Reviews* 36: 1-115.
- Campos-Rivero G, Osorio-Montalvo P, Sánchez-Borges R, Us-Camas R, Duarte-Aké F, De-la-Peña C. 2017. Plant hormone signaling in flowering: an epigenetic point of view. *Journal of Plant Physiology* 214: 16-27. doi: 10.1016/j.jplph.2017.03.018
- Chauvel C. 2018. Cerium. In: White WM (ed.). *Encyclopedia of Geochemistry*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer. Cham, Switzerland. pp. 226-229.
- Cheisson T, Schelter EJ. 2019. Rare earth elements: Mendeleev's bane, modern marvels. *Science* 363(6426): 489-493. doi: 10.1126/science.aau7628
- Cocozza-Talia M, Stellacci P. 1979. A research on the effect of gibberellin upon tulip flowering. *Acta Horticulturae* 91: 167-172. doi: 10.17660/ActaHortic.1979.91.18
- 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
- De Hertog A, van Scheepen J, Le Nard M, Okubo H, Kamenetsky R. 2013. Globalization of the Flower Bulb Industry. In: Kamenetsky R, Okubo H. (eds.). *Ornamental Geophytes. From basic science to sustainable production*. CRC Press. pp. 1-16.
- Diatloff E, Smith FW, Asher CJ. 1995. Rare earth elements and plant growth: III. Responses of corn and mungbean to low concentrations of cerium in dilute, continuously flowing nutrient solutions. *Journal of Plant Nutrition* 18(10): 1991-2003. doi: 0.1080/01904169509365039
- Espindola MCG, de Menezes NL, Barbieri APP. 2013. Efeito do cério na qualidade fisiológica de sementes de milho e no desempenho agrônômico das plantas. *Bioscience Journal* 29(5): 1501-1507.
- Galvão VC, Schmid M. 2014. Regulation of flowering by endogenous signals. In: Fornara F (ed.). *Advances in Botanical Research*. Academic Press Inc. Vol. 72. pp. 63-102.
- 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
- Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI. 2018. The role of beneficial elements in triggering adaptive responses to environmental stressors and improving plant performance. In: Vats S (ed.). *Biotic and abiotic stress tolerance in plants*. Springer. pp.137-172. doi: 10.1007/978-981-10-9029-5\_6
- Habashi F. 2013. Cerium, Physical and Chemical Properties. In: Kretsinger RH, Uversky VN, Permyakov EA (eds.). *Encyclopedia of Metalloproteins*. Springer. pp. 588-588. doi: 10.1007/978-1-4614-1533-6
- Hayat S, Hayat Q, Alyemeni MN, Wani AS, Pichtel J, Ahmad A. 2012. Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signaling & Behavior* 7(11): 1456-1466. doi: 10.4161/psb.21949
- He YW, Loh CS. 2000. Cerium and lanthanum promote floral initiation and reproductive growth of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science* 159(1): 117-124. doi: 10.1016/S0168-9452(00)00338-1
- He YW, Loh CS. 2002. Induction of early bolting in *Arabidopsis thaliana* by triacontanol, cerium and lanthanum is correlated with increased endogenous concentration of isopentenyl adenosine (iPAdos). *Journal of Experimental Botany* 53(368): 505-512. doi: 10.1093/jexbot/53.368.505
- Jiang J, Hu J, Xie Z, Cao Q, Ma D, Han Y, Li Z. 2017. The trivalent cerium-induced cell death and alteration of ion flux in sweetpotato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam]. *Journal of Rare Earths* 35(12): 1273-1282. doi: 10.1016/j.jre.2017.06.006
- Kamenetsky R, Okubo H. 2013. Introduction. In: Kamenetsky R, Okubo H (eds.). *Ornamental geophytes. From basic science to sustainable production*. CRC Press. pp. xv-xvii.
- Kurtar ES, Ayan AK. 2005. Effect of gibberellic acid (GA3) and indole-3-acetic acid (IAA) on flowering, stalk elongation and bulb characteristics of tulip (*Tulipa gesneriana* var. *cassini*). *Pakistan Journal of Biological Sciences* 8(2): 273-277.
- Li S, Zhang S, Ding X, Liao X, Wang R. 2013. Spraying silicon and/or cerium sols favorably mediated enhancement of Cd/Pb tolerance in lettuce grown in combined Cd/Pb contaminated soil. *Procedia Environmental Sciences* 18: 68-77. doi: 10.1016/j.proenv.2013.04.010
- 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
- Liu R, Shan C, Gao Y, Wang J, Xu Z, Zhang, Ma W, Tan R. 2016a. Cerium improves the copper tolerance of turf grass *Poa pratensis* by affecting the regeneration and biosynthesis of ascorbate and glutathione in leaves. *Brazilian Journal of Botany* 39(2): 779-785. doi: 10.1007/s40415-015-0246-7
- Liu Y, Song H, Zhang J, Richardson MD. 2016b. Growth Characteristics of Bahiagrass Roots Treated with Micronutrients, Rare Earth Elements, and Plant Hormones. *HortTechnology* 26(2): 176-184. doi: 10.21273/HORTTECH.26.2.176

- 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 CeO<sub>2</sub> nanoparticles and assessment of their differential toxicity in four edible plant species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58(6): 3689. doi: 10.1021/jf904472e
- Luo J, Zhang J, Wang Y. 2008. Changes in endogenous hormone levels and redox status during enhanced adventitious rooting by rare earth element neodymium of *Dendrobium densiflorum* shoot cuttings. *Journal of Rare Earths* 26(6): 869-874. doi: 10.1016/S1002-0721(09)60023-5
- Ma JJ, Ren YJ, Yan L Y. 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
- Mao CX, Chen MM, Wang L, Zou H, Liang CJ, Wang LH, Zhou Q. 2012. Protective effect of cerium ion against ultraviolet B radiation-induced water stress in soybean seedlings. *Biological Trace Element Research* 146(3): 381-387. doi: 10.1007/s12011-011-9264-x
- Ramírez-Olvera SA, Trejo-Téllez LI, García Morales S, Pérez-Sato A, Gómez-Merino FC. 2018. Cerium enhances germination and shoot growth, and alters mineral nutrient concentration in rice. *PLoS ONE* 13(3): e0194691. doi: 10.1371/journal.pone.0194691
- Ramos SJ, Dinali GS, Oliveira C, Martins GC, Moreira CG, Siqueira JO, Guilherme LR. 2016. Rare earth elements in the soil environment. *Current Pollution Reports* 2(1): 28-50. doi: 10.1007/s40726-016-0026-4
- SAS Institute. 2013. Base SAS 9.4. Procedures Guide: Statistical Procedures Second edition. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 500 p.
- Steiner AA. 1984. The universal nutrient solution. In: Proceedings Sixth International Congress on Soilless Culture, ISOSC. Lunteren, Wageningen, The Netherlands, pp. 633-650.
- Sumanta N, Haque CI, Nishika J, Suprakash R. 2014. Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvents. *Research Journal of Chemical Sciences* 4(9): 63-69. doi: 10.1055/s-0033-1340072
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Alcántar-González G. 2016. Elementos benéficos: potencialidades y limitantes. In: Alcántar-González G, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC (eds.). *Nutrición de cultivos. Segunda edición. Biblioteca Básica de Agricultura*. pp. 59-101.
- Tyler G. 2004. Rare earth elements in soil and plant systems-A review. *Plant and Soil* 267(1-2): 191-206. doi: 10.1007/s11104-005-4888-2
- Voncken JHL. 2016. The ore minerals and major ore deposits of the Rare Earths. In: Voncken JHL (ed.). *The Rare Earth Elements, Springer Briefs in Earth Sciences*. pp. 15-52. doi: 10.1007/978-3-319-26809-5
- Wang C, Lu X, Tian Y, Cheng T, Hu L, Chen F, Jiang C, Wang X. 2011. Lanthanum resulted in unbalance of nutrient elements and disturbance of cell proliferation cycles in *V.*

- faba L. seedlings. *Biological Trace Element Research* 143(2): 1174-1181. doi: 10.1007/s12011-010-8939-z
- 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(1): 78-82. doi: 10.1016/S1002-0721(14)60035-1
- Wang L, Zhang X, Zhou Q, Huang X. 2015. Effects of terbium (III) on signaling molecules in horseradish. *Biological Trace Element Research* 164(1): 122-129. doi: 10.1007/s12011-014-0209-z
- Wang X, Lin Y, Liu D, Xu H, Liu T, Zhao F. 2012. Cerium toxicity, uptake and translocation in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Journal of Rare Earths* 30(6): 579-585. doi: 10.1016/S1002-0721(12)60094-5
- Wang X, Shi GX, Xu QS, Xu BJ, Zhao J. 2007. Lanthanum-and cerium-induced oxidative stress in submerged *Hydrilla verticillata* plants. *Russian Journal of Plant Physiology* 54(5): 693-697. doi.org/10.1134/S1021443707050184
- Wang Y, Wang L, Ma C, Wang K, Hao Y, Chen Q, Mo Y, Rui Y. 2019. Effects of cerium oxide on rice seedlings as affected by co-exposure of cadmium and salt. *Environmental Pollution* 252: 1087-1096. doi: 10.1016/j.envpol.2019.06.007
- Wu M, Wang PY, Sun LG, Zhang JJ, Yu J, Wang YW, Chen GX. 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
- Xu QM, Wang YZ, Liu H, Cheng JS. 2016. Physiological responses and chromosomal aberration in root tip cells of *Allium sativum* L. to cerium treatments. *Plant and Soil* 409(1-2): 447-458. doi: 10.1007/s11104-016-2978-y
- Yuanyuan M, Yali Z, Jiang L, Hongbo S. 2009. Roles of plant soluble sugars and their responses to plant cold stress. *African Journal of Biotechnology* 8(10): 2004-2010.
- Yuguan Z, Min Z, Luyang L, Zhe J, Chao L, Sitao Y, Yanmei D, Na L, Fashui, H. 2009. Effects of cerium on key enzymes of carbon assimilation of spinach under magnesium deficiency. *Biological Trace Element Research* 131(2): 154-164. doi: 10.1007/s12011-009-8354-5
- 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. doi: 10.1016/j.apsb.2012.12.005
- Zicari MA, d'Aquino L, Paradiso A, Mastrolitti S, Tommasi F. 2018. Effect of cerium on growth and antioxidant metabolism of *Lemna minor* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 163: 536-543. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.07.113

## CAPÍTULO II. APLICACIÓN FOLIAR DE CERIO EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE TULIPÁN

### 2.1 RESUMEN

Se evaluó el efecto de la aplicación foliar de diferentes concentraciones de Ce en los parámetros de crecimiento, desarrollo y contenidos de algunas biomoléculas en plantas de tulipán cv. Jan van Nes. El cultivo se desarrolló bajo condiciones de malla sombra durante el periodo otoño-invierno. Se realizaron dos aspersiones foliares con soluciones de  $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  a concentraciones de 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  en tulipán, con un intervalo de 15 días, las plantas testigo no recibieron aplicaciones foliares de Ce. Los resultados muestran que el Ce puede alterar la fenología del tulipán, retrasando la formación del botón floral y el periodo para alcanzar la senescencia, sin presentar ningún efecto significativo en la duración de la flor en maceta. Cuarenta días después de la plantación (ddp) el Ce no tuvo efecto significativo en la altura de planta; asimismo, bajas concentraciones de Ce (5 y 15  $\mu\text{M}$ ) redujeron de manera significativa las longitudes de hojas del primer y segundo nudo; y la dosis 5  $\mu\text{M}$  Ce, redujo el diámetro de tallo. Por el contrario, en muestreos posteriores a los 40 ddp, se observó que el Ce en dosis altas (15 y 25  $\mu\text{M}$ ), incrementó la altura de planta, longitud de hoja y de botón floral, peso de la biomasa fresca de la flor, tallo, hoja y bulbo y peso de la biomasa seca de hoja y bulbo. Sin embargo, el Ce no afectó el peso de la biomasa seca de flor y tallo, mientras que 5  $\mu\text{M}$  redujo el peso del bulbo. En el contenido de biomoléculas, todas las concentraciones de Ce aumentaron de manera significativa el contenido de azúcares solubles totales en flores; dosis de Ce de 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce incrementaron los contenidos de prolina en hoja y flor; el tratamiento 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentó de manera drástica el contenido de todos los pigmentos fotosintéticos, excepto el contenido de carotenoides. En conclusión, la aplicación foliar de Ce tiene efectos beneficiosos en los parámetros de crecimiento y desarrollo de tulipán, así como los contenidos de biomoléculas.

## 2.2 INTRODUCCIÓN

Los elementos de tierras raras (REE) o también llamados simplemente tierras raras (RE) o metales de tierras raras (REM); son elementos metálicos químicamente similares, 15 lantánidos más escandio e itrio (Shtangeeva, 2014; Balaram, 2019). La concentración promedio estimada de REE en la corteza terrestre, varía de alrededor de  $130 \mu\text{g g}^{-1}$  a  $240 \mu\text{g g}^{-1}$ , que en realidad es significativamente más alta que otros elementos comúnmente explotados (Zepf, 2013).

Actualmente, estos elementos se han vuelto muy críticos para varias tecnologías modernas que van desde teléfonos celulares y televisores hasta bombillas LED y turbinas eólicas (Balaram, 2019). La agricultura no ha sido la excepción, los REEs se han empleado a gran escala como microfertilizantes especialmente en China, los cuales, suministrados a bajos niveles aumenta el rendimiento y la calidad (Diatloff *et al.* 1995; Hong *et al.*, 2000). Los REEs se aplican básicamente en tres tipos de fertilizantes (1) nitratos, (2) cloruros y óxidos y (3) complejos con aminoácidos (Pang *et al.*, 2002). Los REEs más empleados y estudiados en las plantas son el Ce y La, estos elementos se pueden aplicar directamente en el suelo o de manera foliar (Tyler, 2004).

Esta investigación evaluó la aplicación foliar de Ce en tulipán; en este contexto, se han reportado varias ventajas de este método de aplicación. En plantas de col china (*Brassica chinensis* L.) aumenta el contenido de vitamina C (Ma *et al.*, 2014); promueve la fotosíntesis y mejora de la eficiencia de la carboxilación en plántulas de colza (*Brassica juncea* L.) (Liang *et al.*, 2006); aumenta el área foliar en plantas de frijol común (Salehi *et al.*, 2018); mejora el crecimiento y la concentración de metabolitos secundarios en plántulas de *Cyclocarya paliurus* (Xie *et al.*, 2015), entre otros beneficios.

En vista del potencial de Ce para aumentar el crecimiento y la calidad de los cultivos, y de que no existen reportes en la literatura de los efectos de Ce aplicados vía foliar en la producción de ornamentales. Esta investigación tuvo como objetivo estudiar los efectos de la aplicación foliar de diferentes concentraciones de Ce en los parámetros de crecimiento, desarrollo, y contenido de algunas biomoléculas en plantas de tulipán Cv. Jan van Nes.

## 2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.3.1 Material vegetal y condiciones del experimento

El presente estudio se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero con cubierta y malla sombra (monofilamente negro calibre 70%) en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.

Se emplearon bulbos comerciales de tulipán cultivar Jan Va Nes, provenientes de la casa comercial EUROBULBOS, S. de R. L. de C. V. Este cultivar presenta un color amarillo intenso. Como sustrato se utilizó una mezcla de tezontle rojo, perlita (Agrolita<sup>MR</sup>) y turba (Promix<sup>®</sup> FLX) en una proporción 70:20:10 (v:v:v), la siembra se realizó en macetas de 7 pulgadas.

Antes de la siembra de los bulbos, éstos se desinfectaron por el método de inmersión durante 15 min, en una solución compuesta por 2 g L<sup>-1</sup> de Ridomil Gold<sup>®</sup> Bravo SC [metalaxil-M (3.30%) + clorotalonil (33.00%)] y 1 g L<sup>-1</sup> de Captán<sup>®</sup> [N-triclorometiltio-4-ciclohexeno-1,2-dicarboximida (50%).

La temperatura promedio que se registró durante el ciclo de cultivo fue 14 °C, 52% de humedad relativa y una intensidad lumínica de 125 lumens m<sup>-2</sup>.

Para la fertilización se empleó la solución nutritiva Steiner (Steiner, 1984) al 50%, que contenía en g L<sup>-1</sup>: 0.5313 Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 4H<sub>2</sub>O, 0.2464 MgSO<sub>4</sub> 7H<sub>2</sub>O, 0.0680 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0.1516 KNO<sub>3</sub> y 0.1306 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; misma que se complementó con la mezcla comercial de micronutrientes TradeCorp<sup>®</sup> AZ adicionando 0.0665 g L<sup>-1</sup> de solución nutritiva. El pH de la solución nutritiva fue ajustado a 5.3, utilizando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado. La solución nutritiva se suministró en el sistema de riego por goteo localizado, el cual fue programado con un temporizador digital (Steren, China), se aplicaron 4 riegos al día, con una duración de un minuto cada uno, aplicando un volumen promedio de 80 mL cada uno.

### 2.3.2 Tratamiento y diseño experimental

Se asperjaron soluciones de cloruro de Ce (CeCl<sub>3</sub> 7H<sub>2</sub>O) con concentraciones de 5, 15 y 25 µM en las hojas de tulipán, a los 30 y 45 días después de la siembra de bulbos. Las plantas testigo, no recibieron aplicaciones foliares de Ce. Las soluciones fueron preparadas el mismo día de la aplicación, cada aspersion se realizó a primera hora de la mañana, rociando completamente las plantas hasta punto de goteo, con un volumen promedio de 40 mL por aplicación y un total de 80 mL

durante el ciclo productivo. Las plantas vecinas se protegieron con un plástico para evitar la contaminación. En todos los tratamientos con Ce, incluyendo el testigo se empleó un adherente-dispersante comercial Tween™ 20 en una concentración de 1 g L<sup>-1</sup>. El pH promedio de las soluciones fueron 4.08, 4.67, 4.16 y 3.99 para el tratamiento testigo, 5, 15 y 25 µM Ce respectivamente.

Para el acomodo de los tratamientos, se empleó un diseño completamente al azar (DECA), la unidad experimental consistió en una planta por maceta y cada tratamiento tuvo nueve repeticiones.

### **2.3.3 Variables evaluadas**

#### **2.3.3.1. Parámetros de crecimiento y desarrollo**

Se evaluó el efecto de la aplicación foliar de Ce en la formación del botón floral, coloración, antesis y senescencia.

La formación del botón floral se definió contabilizando los días transcurridos desde la plantación (ddp), hasta la aparición del primer botón floral. La coloración se registró en ddp, esta variable se definió cuando el botón floral presentó cambios en su coloración (tépalos verdes con un borde amarillo). La antesis se consideró cuando la flor estaba completamente abierta, y el gineceo mostraba los tres lóbulos del estigma y todos los estambres completamente formados, registrando esta variable en ddp. La planta se consideró senescente cuando la flor presentó pérdida de color, marchitamiento y caídas de tépalos, esta variable se registró en ddp.

La duración de la flor en maceta se estimó contabilizando los días desde la antesis hasta la senescencia.

Se determinó la altura de planta a los 40, 50 y 60 ddp midiendo desde la base del tallo hasta el ápice en crecimiento. A los 40, 50 y 60 ddp se midieron las longitudes de hojas del primer y segundo nudo. El diámetro de tallo se determinó a los 40 y 60 ddp empleando un vernier digital (Trupper). La longitud del botón floral se determinó a los 50 y 60 ddp.

Las plantas de tulipán fueron cosechadas cuando se consideraron senescentes y se dividieron en bulbo, tallo, hoja y flor con el fin de obtener el peso de la biomasa fresca y seca. Empleando una balanza analítica (Adventurer™ Pro, Ohaus, USA) se determinó el peso fresco de cada órgano, finalmente para estimar del peso de la biomasa seca, las muestras de cada órgano fueron colocadas en una estufa de

circulación de aire forzado (Riossa HCF-125, México) por 72 h con una temperatura de 72 °C.

### **2.3.3.2 Azúcares solubles totales**

La cuantificación los azúcares solubles totales se realizó en hojas y flores senescentes que fueron recolectadas al final del ciclo del cultivo (64 ddp). Se pesaron 1,000 mg de hoja y 250 mg de flor, el tejido fue previamente molido en nitrógeno líquido. Se empleó el método descrito por [Bailey \(1958\)](#) con antrona, ácido sulfúrico y alcohol al 80%. Para cuantificar los azúcares totales, se realizó una curva estándar usando glucosa (Sigma-Aldrich; Saint Louis, MO, EE. UU.). Se midió en una absorbancia de 600 nm en un espectofotómetro (Genesys™ 10S ThermoFisher Scientific; Waltham, MA, EE. UU.)

### **2.3.3.3 Prolina libre total**

La prolina libre total se determinó en hojas y flores senescentes de tulipán al finalizar el ciclo del cultivo (64 ddp). Se empleó el método descrito por [Bates et al. \(1973\)](#), en el cual se utilizaron 500 mg de hojas y 200 mg de flores previamente molidos en nitrógeno líquido. Luego se realizó una primera extracción macerando las muestras con 5 mL de ácido sulfosalicílico al 3%, y filtrando la muestra con papel de filtro Whatman No. 4. Posteriormente, se mezclaron 2 mL de solución de ninhidrina (2.5% p/v contenido en la solución de 60% de ácido acético concentrado y 40% de ácido fosfórico 6 M), más 2 mL de ácido acético glacial concentrado y 2 mL del extracto de cada muestra. La mezcla se incubó en baño María a 95 °C durante 40 min. La reacción se detuvo colocando las muestras en hielo. Después de la reacción, se añadieron 4 mL de tolueno a cada muestra, se mezclaron brevemente en un vórtex y se incubaron a temperatura ambiente durante 15 min. Para la cuantificación de la prolina, se construyó una curva estándar usando L-prolina (400 nM mL<sup>-1</sup>) y la absorbancia correspondiente se midió a 520 nm en un espectofotómetro (Genesys™ 10S ThermoFisher Scientific; Waltham, MA, EE. UU.)

### **2.3.3.4 Clorofilas a, b, total y carotenoides**

La cuantificación de clorofila se realizó en hojas senescentes de tulipán recolectadas al final del ciclo del cultivo (64 ddp) por el método de [Sumanta et al. \(2014\)](#). La extracción se realizó con acetona al 80%. La absorbancia se midió a 470 nm, 646.8 nm y 663.2 nm en un espectofotómetro (Genesys™ 10S ThermoFisher Scientific; Waltham, MA, EE. UU.) y las concentraciones se estimaron usando las siguientes fórmulas: Clorofila a (Ch a; µg mL<sup>-1</sup>) = 12.25(A<sub>663.2</sub>) - 2.79 (A<sub>646.8</sub>);

Clorofila *b* (Ch *b*;  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) =  $21.50(A_{646.8}) - 5.10 (A_{663.2})$ ; Clorofila total (Ch tot ;  $\mu\text{g mL}^{-1}$ )= Ch *a* + Ch *b* = Carotenoides totales (Car;  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) =  $1000 (A_{470} - 1.82 \text{ Ch } a - 85.02 \text{ Ch } b) / 198$ .

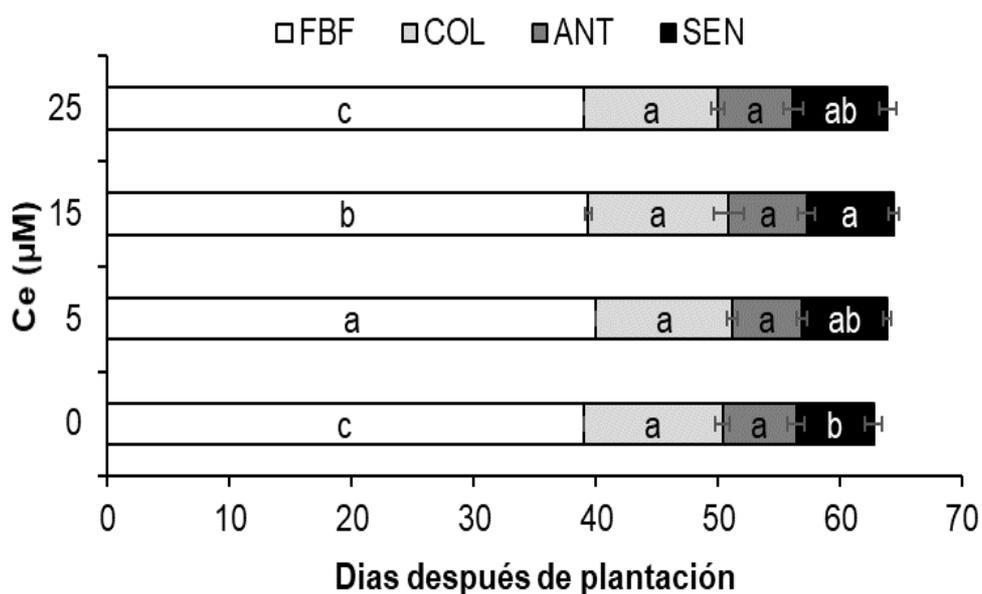
### 2.3.4 Análisis estadístico

Con los datos recolectados se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) empleando el sistema de análisis estadístico SAS versión 9.4 (SAS Institute, 2013).

## 2.4 RESULTADOS

### 2.4.1 Parámetros de crecimiento y desarrollo

Se evaluó el efecto de la aplicación foliar de Ce en la formación del botón floral, coloración, antesis y senescencia (Figura 3.1).

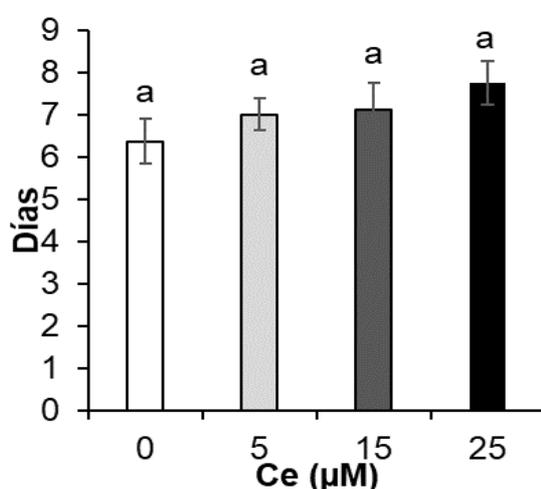


**Figura 3.1.** Formación del botón floral (FBF), coloración de capullos (COL), antesis (ANT) y senescencia (SEN) en plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada barra del mismo color, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). n=8.

Las concentraciones 5 y 15  $\mu\text{M}$  Ce aplicadas vía foliar retrasaron la formación del botón floral en 1 y 0.38 días respectivamente, en comparación con el testigo con formación de botón floral 39 ddp. En tanto que, no existieron diferencias entre tratamientos en la coloración de botón y la antesis (Figura 3.1).

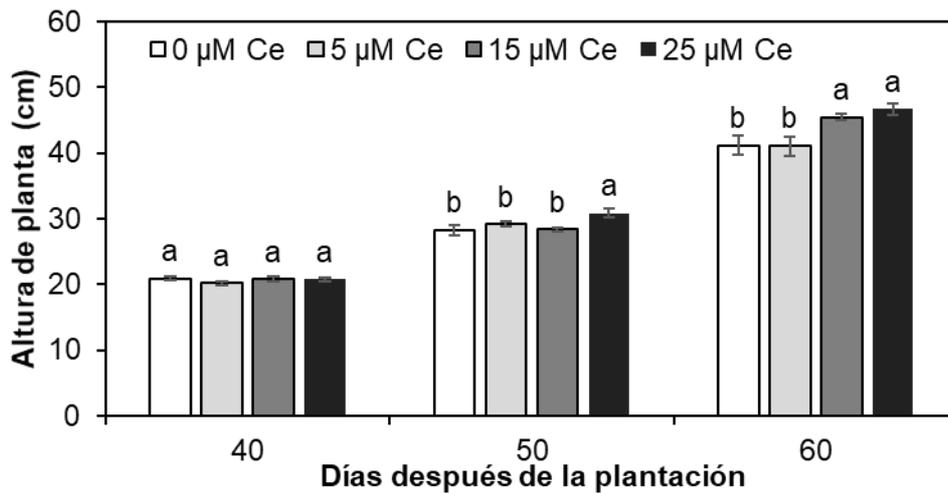
Por otra parte, todos los tratamientos con Ce incrementaron el tiempo en alcanzar la senescencia; sin embargo, solo el tratamiento 15  $\mu\text{M}$  Ce fue diferente al testigo (62.75 ddp); al retrasarse en éste la senescencia en 1.63 días. Las concentraciones de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce prolongaron el tiempo para alcanzar la senescencia en 1.13 días. sin embargo, no existe diferencia significativa con el testigo (**Figura 3.1**).

La duración de la vida de la flor en maceta se prolongó 0.62, 0.75 y 1.37 días con las concentraciones de 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, respectivamente, en comparación al testigo, en donde la flor duró 6.38 días; sin embargo, estos aumentos no fueron significativos desde el punto de vista estadístico (**Figura 3.2**).



**Figura 3.2.** Duración de la flor en plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada barra, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .

La altura de planta a los 40 ddp no se vio afectada por la adición de las diferentes concentraciones de Ce (**Figura 3.3**); en cambio, a los 50 ddp, una alta concentración de Ce (25  $\mu\text{M}$ ) provocó un aumento significativo en la altura superando al testigo en 8.93%. Finalmente, a los 60 ddp, se obtuvieron incrementos en la altura de planta en 10.43 y 13.42% con las dosis de 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, respectivamente, en comparación con el testigo (**Figura 3.3**).

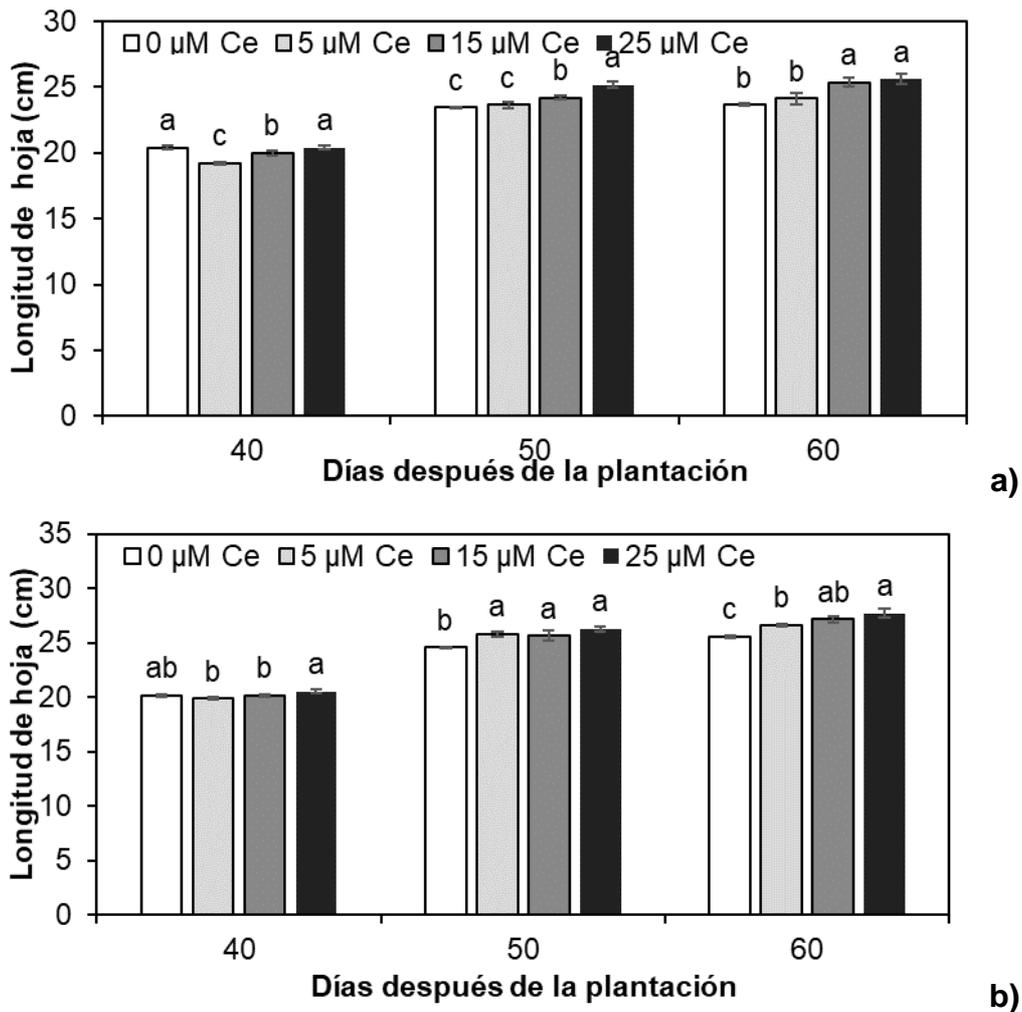


**Figura 3.3.** Altura de plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce, a los 40, 50 y 60 días después de la plantación (ddp). Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .

Las aplicaciones foliares de Ce tuvieron efecto significativo en la longitud de las hojas del primer y segundo nudo como se observa en la (**Figura 3.4**).

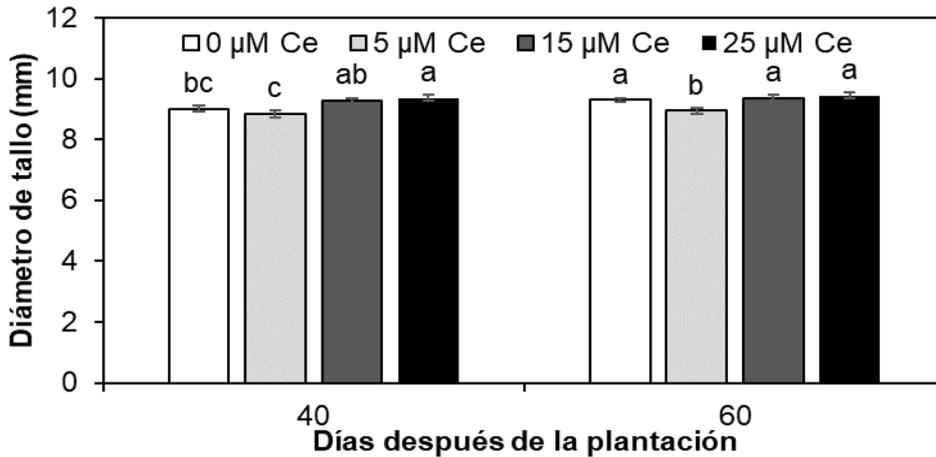
En la primera evaluación realizada 40 ddp, las concentraciones 5 y 15  $\mu\text{M}$  Ce, redujeron en 5.93 y 2.05% la longitud de hoja del primer nudo, respecto al testigo. A los 50 ddp, los tratamientos 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce ocasionaron incrementos significativos de 3.19 y 7.33% en el valor de esta variable, respecto al testigo; asimismo, estas concentraciones causaron aumentos de 7.27 y 8.24% en la longitud de hoja del primer nudo a los 60 ddp en comparación con el testigo (**Figura 3.4a**).

En la longitud de hoja del segundo nudo, a los 40 ddp, la mayor longitud se observó en las plantas asperjadas con 25  $\mu\text{M}$  Ce, registrando un incremento de 1.78%, respecto al testigo; sin embargo, dicho incremento no fue significativo. Resultados contrarios se observaron con las dosis de 5 y 15  $\mu\text{M}$  Ce, los cuales causaron una reducción en esta variable, pero los decrementos no fueron estadísticamente significativos respecto al testigo. En las dos últimas evaluaciones todas las concentraciones de Ce aumentaron en forma significativa el valor de esta variable, con incrementos del 5.00, 4.39 y 6.91% a los 50 ddp y de 4.10, 6.25 y 8.40% a los 60 ddp con las dosis 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, respectivamente, todos en comparación con el testigo (**Figura 3.4b**).



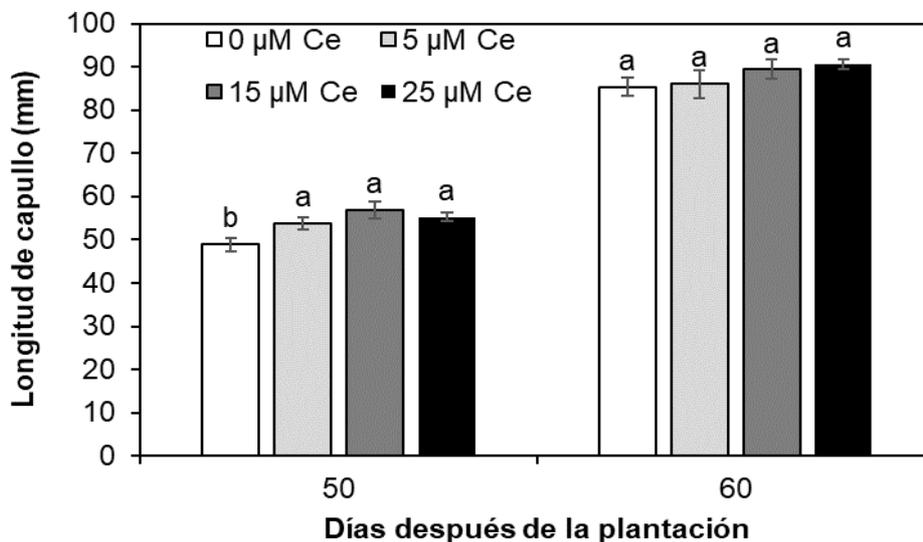
**Figura 3.4.** Longitudes de hojas del primer (a) y segundo nudo (b) de plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce, a los 40, 50 y 60 días después de la plantación. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .

Plantas asperjadas con las dosis de 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce exhibieron el mayor diámetro del tallo a los 40 ddp, superando al testigo en 2.88 y 3.88%; por el contrario, se observó que la dosis de 5  $\mu\text{M}$  Ce redujo el valor de esta variable en 1.77% a los 40 ddp y 3.76% a los 60 ddp, en comparación con el testigo, siendo diferente desde el punto de vista estadístico al testigo solo 60 ddp (**Figura 3.5**).



**Figura 3.5.** Diámetro de tallo basal en plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce, a los 40 y 60 días después de la plantación. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .

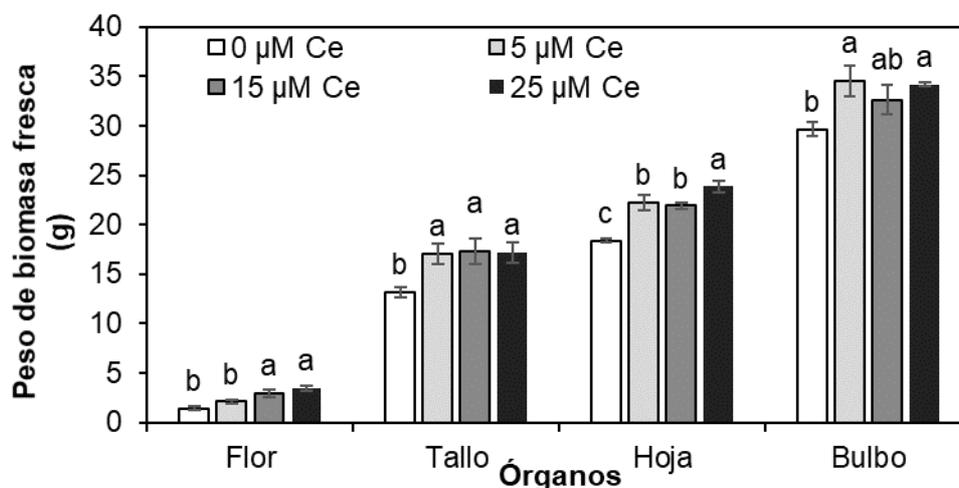
En el **Figura 3.6** se observa que las diferentes concentraciones de Ce aplicados vía foliar solo tuvieron efecto en la longitud de capullo a los 50 ddp, donde dosis de 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, aumentaron la longitud de capullo en 9.84, 16.24 y 12.97%, respectivamente, en comparación con las plantas testigo.



**Figura 3.6.** Longitud de capullo floral en plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce, a los 50 y 60 días después de la plantación. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .

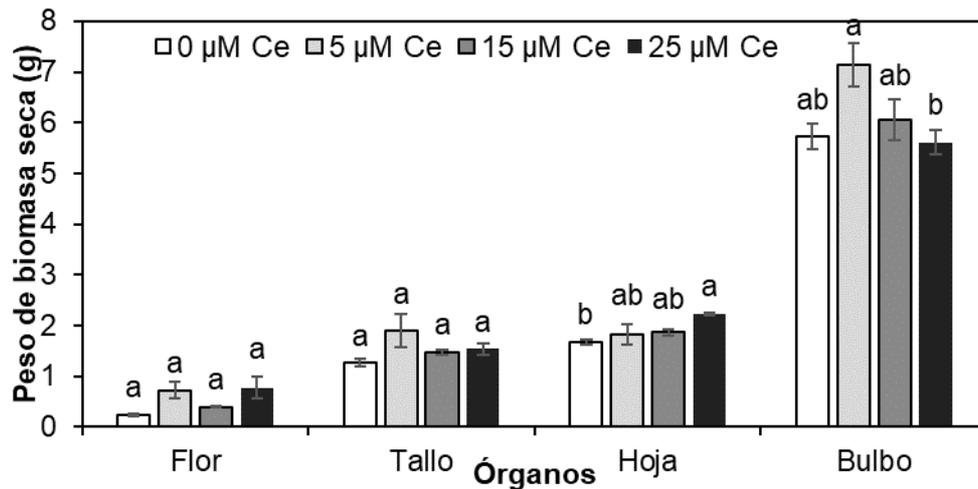
El peso de la biomasa fresca de flores de plantas tratadas con 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce tuvo un aumento de 104.82 y 138.62% respecto al testigo (**Figura 3.7**).

Por otro lado, los pesos de biomasa fresca de tallos, hojas y bulbos incrementaron con el aumento en la dosis de Ce. Dosis de 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce incrementaron el peso de biomasa fresca de tallo en 29.65 y 31.71 y 30.57%; mientras que, en hoja, los incrementos fueron de 20.77, 19.19 y 29.69%; finalmente en bulbo de 16.45, 10.01 y 15.27% respectivamente, en todos los casos en comparación con el testigo (**Figura 3.7**).



**Figura 3.7.** Peso de biomasa fresca al final del ciclo del cultivo, de diferentes órganos de plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .

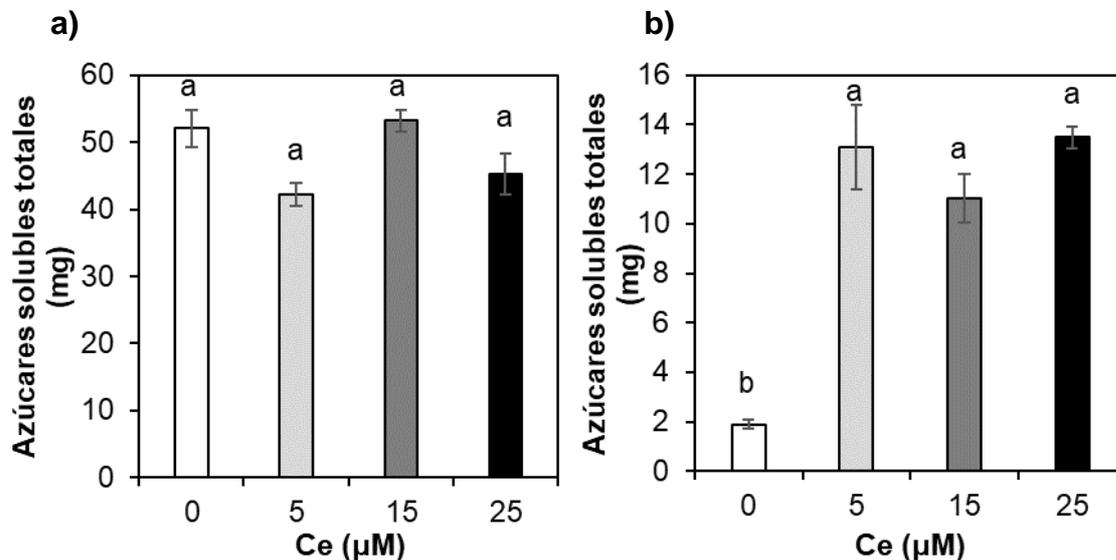
Por otro lado, el peso de la biomasa seca de la flor y tallo no fue influenciado por las aplicaciones foliares de Ce. En la biomasa seca de hoja se registraron aumentos en 8.92, 11.30 y 32.73% en plantas tratadas con dosis de 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  de Ce, respectivamente, en comparación con el testigo. El peso seco de bulbo solo aumentó con el tratamiento 5  $\mu\text{M}$  Ce respecto al testigo, dicho aumento fue de 24.60%; por el contrario, la dosis de 25  $\mu\text{M}$  Ce causó una reducción en el peso seco de bulbo de 2.09%, en comparación al testigo (**Figura 3.8**).



**Figura 3.8.** Peso de biomasa seca al final del ciclo del cultivo, de diferentes órganos de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=8$ .

#### 2.4.2 Azúcares solubles totales

El contenido de azúcares solubles totales en hojas no se vio afectado por las aplicaciones foliares de Ce como se observa en la **Figura 3.9a**.



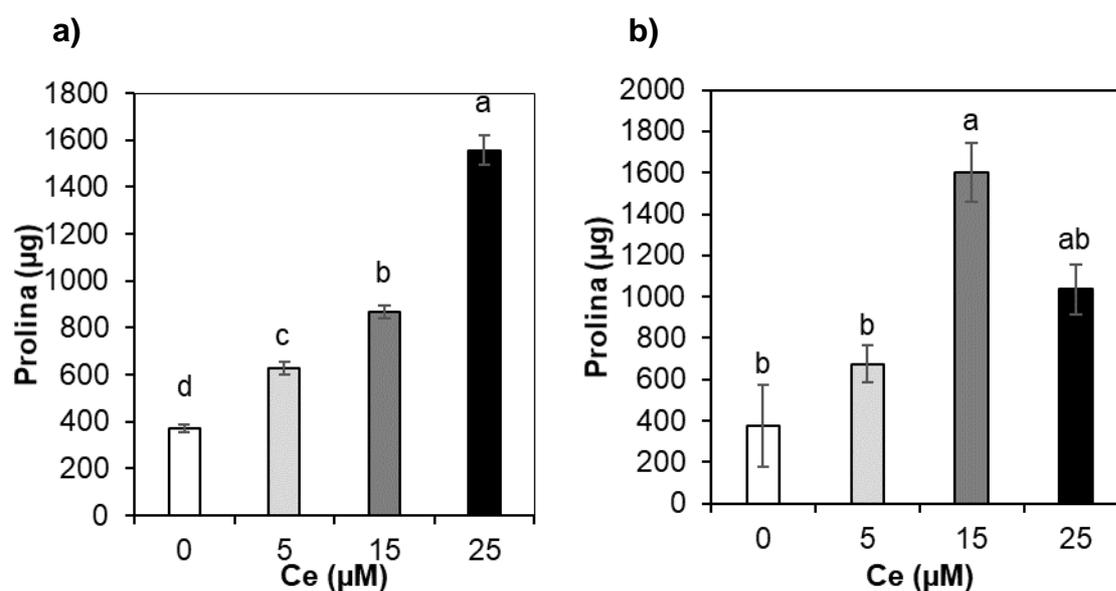
**Figura 3.9.** Contenido de azúcares totales en hojas (a) y flores (b) al final del ciclo productivo, de plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

En flor, todas las concentraciones de Ce provocaron un aumento drástico en el contenido de azúcares de hasta siete veces el valor del testigo (**Figura 3.9b**).

### 2.4.3 Prolina libre total

El contenido de prolina en hojas aumentó a medida que la concentración de Ce incrementaba, los incrementos fueron del orden de 68.13, 132.57 y 317.82% con las dosis de 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, en comparación al testigo (**Figura 3.10a**).

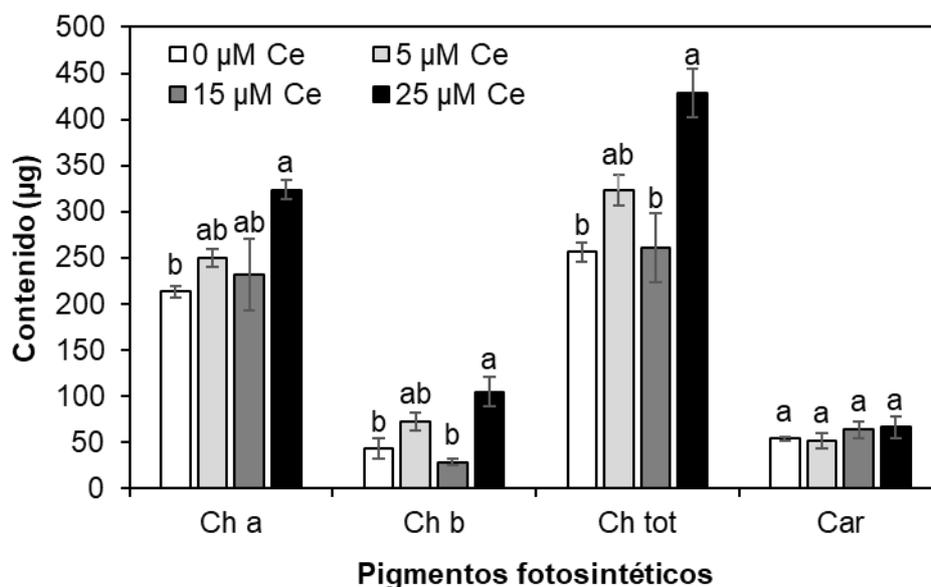
En flores, plantas expuestas a concentraciones de 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce incrementaron en un 323.06 y 173.56% respectivamente, el contenido de prolina en comparación con flores de las plantas testigo (**Figura 3.10b**).



**Figura 3.10.** Contenido de prolina en hojas (a) y flores (b) al final del ciclo productivo, de plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

### 2.4.4 Clorofilas a, b, total y carotenoides

El contenido de clorofila *a* fue mayor en 17.35, 8.81 y 51.71% con las dosis de 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, respectivamente, que en plantas testigo. En cambio, solo concentraciones de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce incrementaron el contenido de clorofila *b* en 68.42 y 143.43% y el contenido de clorofila total en 25.93 y 67.10%, respecto al testigo (**Figura 3.11**).



**Figura 3.11.** Contenido foliar de clorofilas *a*, *b*, total y carotenoides al final del ciclo de cultivo, de plantas de tulipán tratadas vía foliar con distintas concentraciones de Ce. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

Por otra parte, el contenido de carotenoides, no fue influenciado por los tratamientos evaluados (**Figura 3.11**).

## 2.5 DISCUSIÓN

Los elementos de tierras raras pueden afectar el crecimiento vegetativo ([Ramírez-Olvera et al., 2018](#)), la estructura y arquitectura ([Shtangeeva y Ayrault, 2007](#)), la fenología ([Torres-Flores et al., 2018](#)), la calidad poscosecha ([Ramírez-Martínez et al., 2009](#)) y la floración ([He y Loh, 2000](#); [García-Jiménez et al., 2017](#)). Dichas respuestas según lo informado por [Ramos et al. \(2016\)](#), se atribuyen a la capacidad de los REE para desencadenar procesos a través de mensajeros secundarios que causan un efecto en cascada en el metabolismo.

Bajo las condiciones experimentales del presente estudio, los resultados muestran que, las aplicaciones foliares de Ce durante el ciclo productivo afectan de manera significativa la formación del botón floral y el periodo de tiempo para alcanzar la etapa de senescencia (**Figura 3.1**); sin embargo, no tiene un efecto significativo en la coloración del botón floral, antesis y duración de la flor en maceta (**Figura 3.2**). Las concentraciones 5 y 15 µM Ce retrasaron la formación del botón floral en 1.0 y 0.38 días respecto al testigo (39 ddp) (**Figura 3.1**); mientras que, todas las

concentraciones de Ce retrasaron la senescencia de las plantas respecto al testigo. De forma similar, en lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) variedad Mariachi Blue, una concentración de 30  $\mu\text{M}$  La en forma de  $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , otro elemento de tierras raras, aplicado en la solución nutritiva, alarga el ciclo fenológico, asimismo retrasa el inicio de la floración, la apertura floral, la plena floración y el inicio de la senescencia, en tanto que, 10  $\mu\text{M}$  La alarga la vida de la flor en maceta (Torres-Flores *et al.*, 2018). Lo anterior indica que los REE pueden alterar la fenología de las plantas ornamentales, dependiendo la concentración y formas de aplicación.

La aplicación foliar de iones de Ce o nanopartículas (NP) de  $\text{CeO}_2$  pueden ser absorbidos por las hojas y dar como resultado la acumulación en la superficie externa o en la estructura interna de la hoja (Birbaum *et al.*, 2010; Hong *et al.*, 2014; Jahani *et al.*, 2019; Xie *et al.*, 2019). Los iones de  $\text{Ce}^{3+}$  pueden mantener su especie química original dentro de la hoja (Xie *et al.*, 2019) o transformarse en óxido de cerio ( $\text{CeO}_2$ ) (Rodrigues *et al.*, 2019).

Hong *et al.* (2014) y Schwab *et al.* (2016) sugieren que, Ce en forma de NP de  $\text{CeO}_2$  pueden penetrar la superficie de la hoja a través de aberturas naturales de plantas como hidátodos (segmentos libres de cutículas) y estomas, atravesando las paredes celulares del parénquima en empalizada, alcanzan el floema de la hoja distribuyéndose dentro de la planta como NP o en forma de iones. Se ha documentado que el hecho de que las NP de  $\text{CeO}_2$  se adhieran a la superficie externa de la hoja podrían bloquear los estomas o alterar su estructura (Salehi *et al.*, 2018; Jahani *et al.*, 2019), conduciendo a la reducción de la transpiración, la fotosíntesis, y el crecimiento de la planta (Schwab *et al.*, 2016; Salehi *et al.*, 2018). Los resultados aquí obtenidos evidencian que, la aplicación foliar de las diferentes concentraciones de Ce en hojas de tulipán a los 40 ddp, no tuvieron efecto en la altura de la planta (**Figura 3.3**); y efecto negativo con las bajas concentraciones (5 y 15  $\mu\text{M}$ ) en la longitud de hojas del primer y segundo nudo; asimismo, 5  $\mu\text{M}$  Ce tiene efecto negativo en el diámetro de tallo (**Figura 3.4**); probablemente por alguna alteración en la estructura o bloqueo parcial de los estomas.

Rodrigues *et al.* (2019) informan que aspersiones foliares en Ce y La alteran la cera epicuticular y causan colapso de las células periclinales externas en hojas de soya (*Glycine max* L.). Por otra parte, en plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris*), aplicaciones foliares de 40, 80 y 160  $\text{mg Ce L}^{-1}$  en forma de  $\text{CeCl}_3$ , no presentan un

efecto significativo en la altura de la planta, número de hojas, longitud de hoja y porcentaje de materia seca (Xie *et al.*, 2019); estos mismos autores documentan que las exposiciones foliares repetitivas (435 mL volumen total aplicado) dieron como resultado la acumulación de dosis relativamente altas en las hojas, causando necrosis a medida que la dosis de Ce incrementaba.

A los 50 y 60 ddp, se registró un incremento en la altura de planta con dosis altas de Ce (15 y 25  $\mu\text{M}$ ) en comparación al testigo (**Figura 3.3**); estas mismas concentraciones aumentaron la longitud de la hoja del primer nudo en los mismos periodos de evaluación (**Figura 3.4a**); mientras que, en la longitud de hoja del segundo nudo a los 40 ddp, con la concentración 25  $\mu\text{M}$  Ce se obtuvieron los valores más altos y en las dos últimas evaluaciones (50 y 60 ddp) todas las concentraciones de Ce aumentaron el valor de estas variables (**Figura 3.4b**).

Plantas asperjadas con las dosis 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce exhibieron el mayor diámetro de tallo a los 40 ddp (**Figura 3.5**). La longitud del botón floral a los 50 ddp, aumentó de manera significativa con las diferentes concentraciones de Ce, mientras que, no hubo efecto significativo a los 60 ddp (**Figura 3.6**). Estos resultados difieren a lo reportado por Rodrigues *et al.* (2019), donde, la aspersion foliar de 200 y 2000 mg Ce L<sup>-1</sup> en plantas de soya (0.5 mL volumen aplicado) no afectó la altura de la planta, número de hojas, número de vainas y semillas por vaina. En plantas de cempasúchil (*Calendula officinalis* L.) aspersiones foliares de NP de CeO<sub>2</sub> a una concentración de 50 y 100 mg L<sup>-1</sup> aumenta la longitud de brote (Jahani *et al.*, 2019). En frijol, la altura de la parte aérea de planta y longitud de raíz aumenta con la aplicación 1000 mg de NP de CeO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> aplicado vía foliar y al suelo (Salehi *et al.*, 2018). En plántulas de *Cyclocarya paliurus* de 3 años de edad, una concentración de 0.20 mmol L<sup>-1</sup> de nitrato de cerio aplicado de manera foliar, promueve de manera significativa el crecimiento relativo de la planta (Xie *et al.*, 2015).

Es importante destacar que, en este experimento, los efectos negativos causados por Ce fueron más evidentes en el momento en que se hicieron las dos aplicaciones foliares, es decir antes de los 45 días después de la plantación, posiblemente porque las hojas podrían estar desencadenando el sistema de defensa de las plantas por la exposición a Ce como lo sugiere Rodrigues *et al.* (2019), lo que redujo el crecimiento. Después de este periodo se registraron efectos beneficiosos. Es probable que, al finalizar las aplicaciones foliares, las plantas hayan contrarrestado los efectos negativos de Ce, al metabolizar los iones dentro de la planta.

Las diferencias encontradas en los resultados del presente estudio y los reportados por otros autores podrían estar relacionado por el método de aplicación, dosis, especie vegetal, y periodo e intervalo de aplicación, hay que recordar que en este experimento solo se realizaron dos aspersiones foliares con intervalos de 15 días con un volumen total aplicado de 80 mL.

Los REE pueden tener efectos positivos en la producción de biomasa en la planta al promover la fotosíntesis, debido a un aumento en la tasa de transporte de electrones en la fase fotoquímica de ésta (Giraldo *et al.*, 2014; Ramos *et al.*, 2016). El peso de la biomasa fresca de la flor fue mayor en plantas expuestas a 15 y 25  $\mu\text{M}$  (Figura 3.7), en tanto que, todas las concentraciones de Ce aumentaron el peso de la biomasa de tallo, hoja y bulbo. En lo que respecta al peso de la biomasa seca de la flor y tallo, el Ce no presentó un efecto significativo (Figura 3.8); en contraste, todas las concentraciones de Ce causaron un aumento en el peso seco de la hoja y solo la dosis de 5  $\mu\text{M}$  Ce aumentó la biomasa seca de bulbo, pero 25  $\mu\text{M}$  Ce provocó una disminución en el peso seco de este órgano. En plantas de cempasúchil, aumenta de manera significativa el peso fresco del brote con la adición de 50 y 100 mg de nanocerio  $\text{L}^{-1}$ , mientras que, una dosis de 100 mg  $\text{L}^{-1}$  causa el incremento del peso seco del brote, concentraciones superiores a 200 mg  $\text{L}^{-1}$  tienen efectos negativos (Jahani *et al.*, 2019). En plantas de lechuga, la biomasa aumenta significativamente en un 17.87 y 15.08% con aplicación foliar de 0.05 y 0.10 g  $\text{CeO}_2$   $\text{kg}^{-1}$  respectivamente (Li *et al.*, 2013). Gui *et al.* (2015) documenta que, una concentración de 50 mg NP- $\text{CeO}_2$   $\text{kg}^{-1}$  aplicada al suelo, no tiene impacto en la biomasa de lechuga, mientras que, una dosis de 100 mg  $\text{kg}^{-1}$  disminuye de manera significativa la biomasa seca de raíz y brote. En plantas de frijol común, bajo aplicaciones foliares de cloruro de Ce y nanopartículas de cerio, las plantas presentan un mayor peso fresco y seco cuando son tratadas con dosis de 40 mg  $\text{L}^{-1}$  de Ce en forma de NP que con iones de Ce (Xie *et al.*, 2019).

Las plantas pueden acumular osmolitos como prolina y azúcares solubles como una estrategia de defensa para contrarrestar algunos tipos de estrés abiótico (Chen y Murata, 2002). Las NP de  $\text{CeO}_2$  a altas concentraciones ( $> 200$  mg  $\text{L}^{-1}$ ) suministrado vía foliar aumentan la concentración de prolina en plantas cempasúchil (Jahani *et al.*, 2019), estos autores sugieren que NP de  $\text{CeO}_2$  pueden contribuir a estabilizar las estructuras subcelulares y el cambio osmótico en el citosol celular. En este experimento, el contenido de prolina en hojas aumentó a medida que la

concentración de Ce incrementaba (**Figura 3.10a**). Asimismo, en flores de plantas expuestas a concentraciones altas de Ce (15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce) se obtuvieron incrementos significativos en el contenido de prolina (**Figura 3.10b**).

El contenido de azúcares solubles totales en hoja no se vio afectado por las aplicaciones foliares de Ce (**Figura 3.9a**); en cambio en flor, todas las concentraciones de Ce provocaron un aumento drástico en el contenido de azúcares de hasta siete veces el valor del testigo. En plantas de cempasúchil, la aplicación foliar de 200-3200 mg NP de  $\text{CeO}_2 \text{ L}^{-1}$  de aumenta de manera significativa en contenido de azúcares solubles totales en hojas hasta 1.6 veces respecto a las plantas testigo (Jahani *et al.*, 2019). En tres variedades diferentes de arroz (*Oryza sativa* L.) tratados con 500 mg NP de  $\text{CeO}_2 \text{ L}^{-1}$  al suelo no genera cambios en la concentración de azúcares (Rico *et al.*, 2013). En plantas de lechuga, la aplicación de 1000 mg NP de  $\text{CeO}_2 \text{ kg}^{-1}$  al suelo, tiene un efecto inhibitorio en el contenido de azúcares solubles (Gui *et al.*, 2015). En plantas de frijol común, la aplicación foliar de 40, 80 y 160 mg Ce  $\text{L}^{-1}$  en forma de cloruro de Ce, no presentan un efecto significativo en la concentración de azúcares solubles (Xie *et al.*, 2019).

Todas las concentraciones de Ce aumentaron el contenido de clorofila *a* evaluado al final del ciclo productivo, en cambio, solo concentraciones de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce incrementaron el contenido de clorofila *b* y el contenido de clorofila total en comparación al testigo (**Figura 3.11**). El contenido de carotenoides no se vio afectado por las aplicaciones foliares de Ce. Contrario a estos resultados, en hojas de frijol la concentración de clorofilas *a*, *b*, total y antocianinas disminuye conforme aumenta la dosis de NP de  $\text{CeO}_2$ , estas reducciones son más evidentes cuando se adiciona una concentración de 1000 y 2000 mg NP de  $\text{CeO}_2 \text{ L}^{-1}$  de manera foliar (Salehi *et al.*, 2018). De manera similar, en plantas de cempasúchil la aspersion de 50 y 100 mg nanocerio  $\text{L}^{-1}$  en hojas, causa un incremento en las concentraciones de clorofila *a* y total y una disminución a concentraciones más altas ( $> 200 \text{ mg L}^{-1}$ ). Una concentración de 100 mg nanocerio  $\text{L}^{-1}$  mejora el contenido de clorofila *b*, mientras que el contenido de carotenoides no muestra ningún cambio con la adición de NPs  $\text{CeO}_2$  a una dosis menor a 400 mg  $\text{L}^{-1}$ , pero disminuye con concentraciones más altas (800-3200 mg  $\text{L}^{-1}$ ; Jahani *et al.*, 2019). Por otro lado, las aplicaciones de Ce en forma de cloruro de Ce a una dosis de 40-160 mg  $\text{L}^{-1}$ , no afecta de manera significativa las concentraciones de clorofila en plantas de frijol común (Xie *et al.*, 2019).

En otro punto, al realizar la comparación de los datos obtenidos del Capítulo II en el cual el Ce se suministró en la solución nutritiva desde la plantación de los bulbos de tulipán y las obtenidas en este experimento, se observan resultados completamente diferentes. El Ce muestra un fenómeno de dosis respuesta cuando se aplicó en la solución nutritiva, estimulando los parámetros de crecimiento, desarrollo y fenología de la planta a bajas dosis (5  $\mu\text{M}$ ); por el contrario, una inhibición con una alta concentración. En cambio, al aplicar Ce de manera foliar, las altas concentraciones de Ce (15 y 25  $\mu\text{M}$ ) promovieron algunos parámetros de crecimiento y desarrollo de la planta, en contraste, concentraciones de 5 y 15  $\mu\text{M}$  Ce mostraron efectos negativos (retraso en la floración, efecto nulo en la altura de la planta, diámetro de tallo, disminución de la longitud de hoja del primer y segundo nudo), hay que recalcar que efectos negativos solo fueron evidentes al momento de realizar las aplicaciones foliares (45 ddp), posiblemente porque las plantas desencadenaron el sistema de defensa por la exposición a Ce, así como una alteración en la estructura los estomas lo que ocasiono la reducción del crecimiento y desarrollo, después de este periodo la planta contrarrestó los efectos negativos, mostrando efectos beneficiosos en evaluaciones posteriores. Se argumenta que la repuestas bifásica de Ce depende de la forma de aplicación.

En lo que respecta al contenido de biomoléculas (azúcares solubles totales, prolina y clorofila), la mayoría aumentó de manera considerables cuando se aplicaron altas concentraciones de Ce (25  $\mu\text{M}$ ) tanto de manera foliar como a la raíz. Es probable que estos efectos se deban a un mecanismo de adaptación de las plantas por algún efecto tóxico leve que pudiera estar causando Ce, sin embargo, se sugieren estudios más especializados a nivel morfológico y moleculares, para comprender los efectos causados por altas concentraciones de Ce en las plantas de tulipán.

En un estudio similar en plantas de frijol, la aplicación de NP de  $\text{CeO}_2$  tiene un efecto más evidente cuando se adiciona de manera foliar que en raíz, al ocasionar cambios en la longitud y densidad de estomas, alterar la fotosíntesis y la maquinaria bioquímica de la cadena de transporte. Al mismo tiempo, al acumular osmolitos (prolina y azúcares solubles), fitosideróforos y proteínas pertenecientes a la familia de ciclofilinas y proteínas chaperoninas de 60 kDa por mencionar alguna otra, que están involucradas en el plegramiento de proteínas. Además de provocar daños en la membrana y fuga de electrolitos ([Salehi et al., 2018](#)). Estos autores asocian estos resultados con los niveles de Ce contenidos en las hojas; la absorción del suelo

resulta en una concentración mas baja de Ce en hoja comparada con la resultante de la absorción vía foliar, lo que también podría ser alternativa para explicar nuestros resultados. Esta diferencia marcada podría estar relacionada con la biodisponibilidad, afectada por los procesos de adsorción-desorción y movilidad en el suelo ([Song et al., 2013](#)), y la absorción limitada de las raíces ([Cui et al., 2014](#)).

Los resultados aquí presentados también podrían relacionarse a la diferencia entre los mecanismos de absorción y traslocación de Ce en la planta, aunque éstos aún no están completamente elucidados.

Las plantas tienen una variedad de características que afectan la redistribución de REE, especialmente aquellas relacionadas con la presencia de barreras apoplásticas. Inicialmente, las barreras apoplásticas situadas en las raíces son los primeros obstáculos para que estos elementos lleguen al xilema, lo que perjudica su translocación a los órganos vegetales restantes. Debido a este hecho, los contenidos de REE encontrados en diferentes órganos de plantas siguen la secuencia: raíces > tallos > hojas > flores > frutas > semillas ([Brioschi et al., 2013](#); [Gao et al., 2015](#)).

[Pošćić et al. \(2017\)](#) señalan que el Ce se puede ser absorbido en las células de las raíces y translocarse a los brotes de planta ([Wang et al., 2012](#)), pero su tasa de absorción es mucho más alta que las tasas de translocación desde las raíces a los brotes. El Ce se distribuye principalmente en la pared celular cuando se aplica en altas concentraciones, pudiendo ingresar a las células y causar alteraciones en la estructura celular ([Wang et al., 2012](#)).

Cuando ocurre la absorción de los REE a través de aplicaciones foliares las barreras apoplásticas siguen funcionando como obstáculos para la translocación de estos elementos a diferentes partes de la planta. Sin embargo, en este caso, la distribución de estos elementos sigue el orden: hojas > tallos > raíces > flores > frutos > semillas ([Brioschi et al., 2013](#)). [Guo et al. \(2007\)](#), al realizar aplicaciones foliares de  $^{141}\text{Ce}$  (III) en rábano picante (*Armoracia rusticana*), documenta que el Ce puede penetrar a través de las membranas celulares y entrar en las células del mesófilo de la hoja por los canales apoplasto y simplasto o mediante plasmodesmos para después distribuirse en depósitos extra e intracelulares. [Wang et al. \(2017\)](#) por su parte detectó que, que al asperjar Ce (III) en rábano picante, este elemento se puede anclar a la membrana plasmática en forma de partículas a nanoescala, mientras que una proporción de  $\text{Ce}^{3+}$  se puede oxidar a  $\text{Ce}^{4+}$  y existir en un estado

de valencia mixto en este orgánulo de la célula. Altas concentraciones de Ce sobre la membrana plasmática pueden causar o activar pinocitosis anormal, de esta manera, el Ce puede ser depositado en el citoplasma para formar una nanoesfera y ser mantenida parcialmente en las células de las hojas, y una parte puede migrar al tallo de la hoja, la raíz y suelo.

## 2.6 CONCLUSIÓN

La aplicación foliar de Ce tuvo efectos benéficos en parámetros de crecimiento y desarrollo de tulipán, la mayor parte de éstos fueron evidentes después de 40 ddp, generalmente cuando se emplearon concentraciones de 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce. Bajas concentraciones de Ce (5 y 15  $\mu\text{M}$ ) muestran efectos negativos o nulos 40 ddp, además estas concentraciones retrasaron el periodo de formación del botón floral.

Los tratamientos foliares con altas dosis de Ce pueden mejorar el contenido de biomoléculas de manera significativa. Se sugieren realizar estudios enfocados a estos aspectos para entender si la posible causa de los incrementos está relacionado a la toxicidad por Ce o alguna alteración de los estomas u otra estructura interna de la hoja.

## 2.7 LITERATURA CITADA

- Bailey RW. 1958. The reaction of pentoses with anthrone. *Biochemical Journal* 68(4): 669-672. doi: 10.1042/bj0680669
- Balaram V. 2019. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers* 10(4): 1285–1303. doi: 10.1016/j.gsf.2018.12.005
- Bates LS, Waldren RP, Teare ID. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39: 205-207. doi: 10.1007/BF00018060
- Birbaum K, Brogioli R, Schellenberg M, Martinoia E, Stark WJ, Günther D, Limbach LK. 2010. No evidence for cerium dioxide nanoparticle translocation in maize plants. *Environmental Science & Technology* 44(22): 8718-8723.
- Brioschi L, Steinmann M, Lucot E, Pierret MC, Stille P, Prunier J, Badot PM. 2013. Transfer of rare earth elements (REE) from natural soil to plant systems: implications for the environmental availability of anthropogenic REE. *Plant and Soil* 366(1-2): 143-163.
- Chen TH, Murata N. 2002. Enhancement of tolerance of abiotic stress by metabolic engineering of betaines and other compatible solutes. *Current Opinion in Plant Biology* 5(3): 250–257. doi: 10.1016/S1369- 5266(02)00255-8

- Cui D, Zhang P, Ma Y, He X, Li Y, Zhang J, Zhao Y, Zhang Z. 2014. Effect of cerium oxide nanoparticles on asparagus lettuce cultured in an agar medium. *Environmental Science: Nano* 1(5): 459-465.
- Diatloff E, Smith FW, Asher CJ. 1995. Rare earth elements and plant growth: III. Responses of corn and mungbean to low concentrations of cerium in dilute, continuously flowing nutrient solutions. *Journal of Plant Nutrition* 18(10): 1991-2003. doi: 0.1080/01904169509365039
- Gao JL, Wu M, Wang X, Zhang YZ, Jiang FL, Liu Y, Dai J. 2015. Membrane permeability transition and dysfunction of rice mitochondria effected by Er (III). *The Journal of Membrane Biology* 248(1): 39-46.
- 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
- Giraldo JP, Landry MP, Faltermeier SM, McNicholas TP, Iverson NM, Boghossian AA, Reuel NF, Hilmer AJ, Sen F, Brew JA, Strano MS. 2014. Plant nanobionics approach to augment photosynthesis and biochemical sensing. *Nature Materials* 13(4): 400-408. doi: 10.1038/nmat3890
- Gui X, Zhang Z, Liu S, Ma Y, Zhang P, He X, Li Y, Zhang J, Li H, Rui Y, Liu L, Cao W. 2015. Fate and phytotoxicity of CeO<sub>2</sub> nanoparticles on lettuce cultured in the potting soil environment. *PLoS One* 10(8): e0134261. doi: 10.1371/journal.pone.0134261
- Guo X, Zhou Q, Lu T, Fang M, Huang X. 2007. Distribution and translocation of <sup>141</sup>Ce (III) in horseradish. *Annals of Botany* 100(7): 1459-1465. doi: 10.1093/aob/mcm244
- He YW, Loh CS. 2000. Cerium and lanthanum promote floral initiation and reproductive growth of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science* 159(1): 117-124. doi: 10.1016/S0168-9452(00)00338-1
- Hong F, Wei Z, Zhao G. 2000. Effect of lanthanum on aged seed germination of rice. *Biological Trace Element Research* 75(1-3): 205-213. doi: 10.1385/bter:75:1-3:205
- Hong J, Peralta-Videa JR, Rico C, Sahi S, Viveros MN, Bartonjo J, Zhao L, Gardea-Torresdey JL. 2014. Evidence of translocation and physiological impacts of foliar applied CeO<sub>2</sub> nanoparticles on cucumber (*Cucumis sativus*) plants. *Environmental Science & Technology* 48(8): 4376-4385. doi: 10.1021/es404931g
- Jahani S, Saadatmand S, Mahmoodzadeh H, Khavari-Nejad RA. 2019. Effect of foliar application of cerium oxide nanoparticles on growth, photosynthetic pigments, electrolyte leakage, compatible osmolytes and antioxidant enzymes activities of *Calendula officinalis* L. *Biologia* 74(9): 1063-1075. doi: 10.2478/s11756-019-00239-6

- Li S, Zhang S, Ding X, Liao X, Wang R. 2013. Spraying silicon and/or cerium sols favorably mediated enhancement of Cd/Pb tolerance in lettuce grown in combined Cd/Pb contaminated soil. *Procedia Environmental Sciences* 18: 68-77. doi: 10.1016/j.proenv.2013.04.010
- Liang CJ, Huang XH, Zhou Q. 2006. Effect of cerium on photosynthetic characteristics of soybean seedling exposed to supplementary ultraviolet B radiation. *Journal of Environmental Sciences (China)* 18(6): 1147–1151. doi: 10.1016/S1001-0742(06)60053-3
- 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
- Pang X, Li D, Peng A. 2002. Application of rare-earth elements in the agriculture of China and its environmental behavior in soil. *Environmental Science and Pollution Research* 9(2): 143. doi: 10.1007/BF02987718
- Pošćić F, Schat H, Marchiol L. 2017. Cerium negatively impacts the nutritional status in rapeseed. *Science of the Total Environment* 593: 735-744.
- Ramírez-Martínez M, Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI, Hernández I, Osorio B, Castillo AM, Hernández E. 2009. Effect of lanthane on quality of tulip flower 'Ile de France'. *Acta Horticulturae* 847: 295-300. doi: 10.17660/ActaHortic.2009.847.39
- Ramírez-Olvera SA, Trejo-Téllez LI, García-Morales S, Pérez-Sato A, Gómez-Merino FC. 2018. Cerium enhances germination and shoot growth, and alters mineral nutrient concentration in rice. *PLoS ONE* 13(3): e0194691. doi: 10.1371/journal.pone.0194691
- Ramos SJ, Dinali GS, Oliveira C, Martins GC, Moreira CG, Siqueira JO, Guilherme LR. 2016. Rare earth elements in the soil environment. *Current Pollution Reports* 2(1): 28-50. doi: 10.1007/s40726-016-0026-4
- 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.
- Rodrigues ES, Montanha GS, Marques JPR, de Almeida E, Yabuki LNM, Menegário AA, Pereira de Carvalho HW. 2019. Foliar application of rare earth elements on soybean (*Glycine max* (L): Effects on biometrics and characterization of phytotoxicity. *Journal of Rare Earths*. doi: 10.1016/j.jre.2019.09.004
- Salehi H, Chehregani A, Lucini L, Majd A, Gholami M. 2018. Morphological, proteomic and metabolomic insight into the effect of cerium dioxide nanoparticles to *Phaseolus*

- vulgaris* L. under soil or foliar application. *Science of the Total Environment* 616: 1540-1551. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.159
- SAS Institute. 2013. *Base SAS 9.4. Procedures Guide: Statistical Procedures* Second edition. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 500 p.
- Schwab F, Zhai G, Kern M, Turner A, Schnoor JL, Wiesner MR. 2016. Barriers, pathways and processes for uptake, translocation and accumulation of nanomaterials in plants—Critical review. *Nanotoxicology* 10(3): 257-278. doi: 10.3109/17435390.2015.1048326.
- Shtangeeva I, Ayrault S. 2007. Effects of Eu and Ca on yield and mineral nutrition of wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. *Environmental and Experimental Botany* 59(1): 49-58. doi: 10.1016/j.envexpbot.2005.10.011
- Shtangeeva I. 2014. Europium and cerium accumulation in wheat and rye seedlings. *Water, Air, & Soil Pollution* 225(6): 1964. doi: 10.1007/s11270-014-1964-3
- Song U, Jun H, Waldman B, Roh J, Kim Y, Yi J, Lee EJ. 2013. Functional analyses of nanoparticle toxicity: a comparative study of the effects of TiO<sub>2</sub> and Ag on tomatoes (*Lycopersicon esculentum*). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 93: 60-67. doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.03.033
- Steiner AA. 1984. The universal nutrient solution. *In: Proceedings Sixth International Congress on Soilless Culture, ISOSC*. Lunteren, Wageningen, The Netherlands, pp. 633-650.
- Sumanta N, Haque CI, Nishika J, Suprakash R. 2014. Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvents. *Research Journal of Chemical Sciences* 4(9): 63-69. doi: 10.1055/s-0033-1340072
- Torres-Flores NI, Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI, Alcántar-González G, Trejo-Téllez BI, Sánchez-García P, Bello-Camacho F. 2018. Low concentrations of lanthane in the nutritive solution increase the life of the flower in pot of two varieties of lisianthus. *Agroproductividad* 11(8): 149-153.
- Tyler G. 2004. Rare earth elements in soil and plant systems-A review. *Plant and Soil* 267(1-2): 191-206. doi: 10.1007/s11104-005-4888-2
- Wang L, He J, Yang Q, Lv X, Li J, Chen DD, Ding X, Huang X, Zhou Q, Zhou Q. 2017. Abnormal pinocytosis and valence-variable behaviors of cerium suggested a cellular mechanism for plant yield reduction induced by environmental cerium. *Environmental Pollution* 230: 902-910.

- Wang X, Lin Y, Liu D, Xu H, Liu T, Zhao F. 2012. Cerium toxicity, uptake and translocation in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Journal of Rare Earths* 30(6): 579-585. doi: 10.1016/S1002-0721(12)60094-5
- Xie C, Ma Y, Yang J, Zhang B, Luo W, Feng S, Zhang J, Wang G, He X, Zhang Z. 2019. Effects of foliar applications of ceria nanoparticles and CeCl<sub>3</sub> on common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Environmental Pollution* 250: 530-536.
- Xie Y, Li Y, Liu N, Zhang Y, Guo N, Wang T, Shang X. 2015. Effects of cerium nitrate on the growth and physiological characteristics in *Cyclocarya paliurus* seedlings. *Journal of Rare Earths* 33(8): 898–904. doi: 10.1016/S1002-0721(14)60502-0
- Zepf V. 2013. Rare Earth Elements: What and Where They Are. *In: Rare Earth Elements. Springer Theses (Recognizing Outstanding Ph. D. Research)*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp 11-39.

## **CAPÍTULO III. CERIO EN LA SOLUCIÓN NUTRITIVA DURANTE EL CICLO PRODUCTIVO: INFLUENCIA EN LA CALIDAD POSCOSECHA DE TULIPÁN**

### **3.1 RESUMEN**

El elemento cerio (Ce) pertenece a los lantánidos dentro grupo de los elementos de las tierras raras (REE). Como elemento benéfico, el Ce puede estimular el crecimiento de las plantas superiores y aumentar el rendimiento y la calidad de los cultivos. El presente estudio tiene como objetivo evaluar la influencia del Ce aplicado con la solución nutritiva durante el ciclo productivo, en la vida florero y calidad poscosecha de tulipán cultivar Jan van Nes. Se emplearon tallos florales de tulipanes, cosechados en etapa de brote comercial (49 días después de siembra) y obtenidos de bulbos comerciales, que fueron cultivadas bajo condiciones de malla sombra, durante el periodo otoño-invierno. Las dosis de Ce adicionadas durante el ciclo de producción fueron 0, 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  a partir de  $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Los resultados muestran que la aplicación de 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentó la longitud del tallo floral en poscosecha, mientras que dosis de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce incrementan de manera significativa los diámetros basal, medio y superior de tallo, y la longitud de botón floral, tanto al momento del corte como durante la vida de florero. Al momento del corte, el diámetro de botón floral no se incrementó por los tratamientos con Ce: durante la vida de florero (día 6), la dosis 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentó de manera significativa esta variable. En tanto que, ninguna concentración de Ce incrementó la vida de florero de esta especie, respecto al testigo. Por otro lado, se observó un incremento en la tasa de absorción de agua, peso y masa fresca relativa de los tallos florales de las plantas tratadas con concentraciones de Ce de 5 y 25  $\mu\text{M}$ . Las biomásas frescas de flor, hoja, tallo y total se incrementaron con 25  $\mu\text{M}$  Ce respecto al testigo; mientras que, 15  $\mu\text{M}$  Ce redujo la biomasa fresca de hoja. Asimismo, la dosis baja de Ce (5  $\mu\text{M}$ ) resultó en un aumento significativo la biomasa seca de todos los órganos evaluados y en la biomasa seca total. Por otra parte, dosis de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce aplicadas durante el ciclo productivo, incrementan los contenidos de macronutrientes en todos los órganos evaluados al final de la vida de florero; asimismo, estas dosis de Ce aumentaron de manera significativa el contenido de Fe, Zn, Mn, B en flor, y de Mn en hoja y tallo. Por el contrario, la dosis 15  $\mu\text{M}$  Ce redujo significativamente el contenido de Zn respecto al testigo. El contenido de azúcares solubles totales en hojas y flor se incrementó con 25  $\mu\text{M}$  Ce. En tanto que,

el contenido foliar de clorofilas *a*, *b*, total y de carotenoides incrementó conforme aumentó la dosis de Ce. El contenido de prolina en hojas no mostró diferencia significativa respecto al testigo con la adición de las diferentes dosis Ce; en flores, el contenido de este aminoácido se triplicó con la adición de 25  $\mu$ M Ce, respecto al testigo. En conclusión, Ce tiene una influencia positiva en la calidad poscosecha de tulipán al mejorar parámetros de calidad, contenido nutrimental y algunas biomoléculas, pero no prolongó la duración de la vida de florero.

### 3.2 INTRODUCCIÓN

El tulipán (*Tulipa gesneriana* L.) es una ornamental bulbosa que pertenece a la familia *Liliaceae* (USDA, 2020). Es una de las geófitas más importantes del mundo, con demanda nacional e internacional que la posiciona como la tercera flor de corte más popular después de las rosas y los crisantemos (Byczyńska *et al.*, 2019). Esto se debe a su belleza, elegancia, vistosos colores y a su valor económico (Khan *et al.*, 2006; Amiri *et al.*, 2018).

Holanda es el principal productor de tulipán, seguido por Japón, Francia y Estados Unidos de América; Chile y Argentina destacan en América Latina (Trejo-Téllez *et al.*, 2013). En México, su producción se concentra en el Estado de México con un valor de producción superior a los 9 millones de pesos (SADER, 2020).

Los grandes cambios en la economía mundial, el crecimiento poblacional, y la tecnología han conducido a cambios dramáticos en la industria florícola (Derbyshire *et al.*, 2015). La demanda de diversas flores de corte, en especial los tulipanes, va en aumento (Kamenetsky, 2005). Por tanto, se requiere la producción de flores de calidad. Sin embargo, este cultivo presenta problemáticas tanto en el proceso de producción como en poscosecha, que determinan la duración y calidad de vida de florero. Entre las problemáticas a resolver se encuentran la humedad relativa, la temperatura, la disponibilidad de agua y de nutrimentos, entre otros (Nayeem y Qayoom, 2015). Asimismo, el tulipán al ser una flor de corte, su valor depende, en gran medida, de la vida en florero y de las cualidades decorativas que muestra el tallo durante este periodo (Trejo-Téllez *et al.*, 2013).

Durante el proceso de producción, las problemáticas más comunes generalmente se asocian con aspectos nutrimentales, como la deficiencia de Ca, que provoca un deficiente desarrollo de follaje y aborto floral (Nelson y Niedziela, 1998a), así como la caída del escapo floral (Nelson y Niedziela, 1998b); la deficiencia de B, que

ocasiona grietas transversales de los tallos florales, rotura y deshidratación de tépalos, y pérdida de antocianinas (Ikarashi y Baba, 1977; Bobadilla y Chimenti, 2013); la deficiencia de N, da lugar a plantas menos vigorosas, hojas pequeñas, senescencia temprana del follaje y floración tardía; mientras que, la deficiencia de P se refleja en un crecimiento reducido, floración ligeramente retrasada, flores más pequeñas y tallos más cortos (Hewitt y Miles, 1954).

Durante la poscosecha, la duración de la vida de florero es afectada por las condiciones de almacenamiento, relaciones hídricas, presencia de hongos y bacterias, suministro de carbohidratos y estatus de reguladores de crecimiento (Reid y Jiang, 2012). La principal limitante de la vida en florero del tulipán es la senescencia de tépalos, generalmente seguida de la abscisión de éstos (Aros *et al.*, 2017) y amarillamiento temprano de las hojas (Ferrante *et al.*, 2003). En muchos cultivares el entrenudo del tallo superior muestra una alta tasa de alargamiento durante la vida en jarrón provocando una flexión indeseable del tallo (Van Doorn *et al.*, 2011). Por lo anterior, se han propuesto diversas alternativas que ayuden a mejorar la calidad de producción y posproducción del cultivo de tulipán.

En otro punto, el cerio (Ce) pertenece a los elementos de las tierras raras (REE) y es el más abundante de este grupo en la corteza terrestre seguido del lantano (La) (Ramos *et al.*, 2016; Kotelnikova *et al.*, 2019). En el suelo, el Ce se origina del material parental, procesos de minería y por el uso de fertilizantes orgánicos e inorgánicos, especialmente fosfatos (Pang *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2010; Dahle y Arai, 2015). Los REE cada vez son más utilizados por el hombre en la industria electrónica, medicina y agricultura (Barrios *et al.*, 2017).

En la agricultura, el Ce estimula el crecimiento y aumenta el rendimiento y la calidad de los cultivos (Pang *et al.*, 2002; Hu *et al.*, 2006). La aplicación de bajas concentraciones de Ce y La en *Arabidopsis thaliana*, promovió significativamente la inducción de la iniciación floral y número de flores producidas por planta (He y Loh, 2000). Zhao *et al.* (2012) sugieren que la aplicación de Ce mejora el crecimiento de maíz bajo deficiencia de Mg, al promover la asimilación de nitrógeno y carbono y aumentar la actividad del fotosistema II. Zhou *et al.* (2011) documentaron que el Ce<sup>3+</sup> puede activar la expresión de enzimas clave para la biosíntesis de clorofila que se ven afectadas por la deficiencia de Mg. En condiciones de estrés salino y deficiencia de K, el Ce estimula significativamente el crecimiento de plántulas de maíz, reduce el daño morfológico y estructural de las hojas, disminuye el estrés

oxidativo y aumenta la capacidad antioxidante de las hojas (Hong y Wang, 2017). Yang *et al.* (2005) reportan que el Ce evita la rápida senescencia del cloroplasto al estar expuesto a una condición de estrés (iluminación prolongada), al disminuir la acumulación de especies reactivas de oxígeno y malondialdehído (MDA).

En ornamentales, el Ce se ha empleado en la solución florero. En *Rosa chinensis* Jacq. mejora las actividades de las enzimas antioxidantes, aumenta el número de flores abiertas, disminuye el número de flores marchitas e incrementa el contenido de clorofila (Wang *et al.*, 2017). En *Lilium longiflorum* mejoró notablemente las actividades de las enzimas que regulan el ciclo ascorbato-glutación, el contenido relativo de agua y los contenidos de azúcar soluble, también redujo notablemente los contenidos de malondialdehído (MDA) y de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en los pétalos (Hou *et al.*, 2018). De igual manera en *Dianthus caryophyllus*, el Ce aumentó el metabolismo del ascorbato-glutación en pétalos (Zheng y Gou, 2018).

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la influencia del Ce aplicado vía solución nutritiva durante el ciclo productivo, en la vida de florero y calidad poscosecha de tulipán cv. Jan van Nes.

### 3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.3.1 Material vegetal y condiciones del experimento

Para la producción de los tallos florales se adquirieron bulbos comerciales de tulipán (*Tulipa gesneriana*) cultivar Jan van Nes con el proveedor EUROBULBOS, S. de R. L. de C. V. Este cultivar presenta un color amarillo intenso.

Antes de realizar la siembra de bulbos fueron necesarias la limpieza y la desinfección de éstos para evitar posible desarrollo de hongos comunes en los bulbos como *Botrytis cinerea* Pers., *Fusarium oxysporum* f. sp. tulipae, *Rhizoctonia solani* Kühn y *Phytophthora* sp. Los bulbos se desinfectaron por el método de inmersión durante 15 min en una solución compuesta por 2 g Ridomil Gold® Bravo SC [metalaxil-M (3.30%) + clorotalonil (33.00%)] L<sup>-1</sup> y 1 g Captan® [N-triclorometiltio-4-ciclohexeno-1,2-dicarboximida (50%)] L<sup>-1</sup>.

La siembra de bulbos se realizó en macetas de 7 pulgadas con un sustrato consistente en tezontle:perlita:turba (70:20:10, v:v:v), durante el ciclo otoño-invierno 2018. El experimento se desarrolló bajo condiciones de invernadero con cubierta y malla sombra (monofilamente negro calibre 70%), con una temperatura diurna

promedio de 21.6 °C y nocturna media de 7.1 °C, humedades relativas diurna y nocturna medias de 31.7% y 70.5%, respectivamente. Los valores de intensidad lumínica diurna y nocturna fueron de 258.6 lumens m<sup>-2</sup> y 1.5 lumens m<sup>-2</sup>, respectivamente.

Durante el ciclo de productivo el sistema de riego empleado fue riego por goteo localizado, se utilizaron mangueras de 16 mm de diámetro, donde se colocaron goteros autocompensantes de 4 L, a cada gotero se le colocaron adaptadores de cuatro salidas para el acomodo del tubín y la estaca. El sistema de riego estuvo conformado de tanques de almacenamiento con capacidad de 200 L para la solución nutritiva, colocando un tanque por cada tratamiento a evaluar. La distribución de la solución nutritiva se realizó mediante bombas de ½HP. El riego se programó empleando un temporizador digital (Steren, China), con cuatro tiempos de riego al día, con una duración de un minuto cada uno.

La fertilización empleada en el ciclo productivo fue la solución nutritiva Steiner (Steiner, 1984) al 50%, misma que contenía en g L<sup>-1</sup>: 0.5313 de Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 4H<sub>2</sub>O, 0.2464 de MgSO<sub>4</sub> 7H<sub>2</sub>O, 0.0680 de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0.1516 de KNO<sub>3</sub> y 0.1306 de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La solución nutritiva se complementó con la mezcla comercial de micronutrientes TradeCorp® AZ adicionando 0.0665 g L<sup>-1</sup> de solución nutritiva, que aporta en mg L<sup>-1</sup>: 4.99 de Fe, 2.33 de Mn, 0.47 de Zn, 0.18 de Cu, 0.43 de B y 0.17 de Mo. El pH de la solución nutritiva fue ajustado a 5.3, utilizando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado.

Desde la siembra de los bulbos y durante todo el ciclo productivo se adicionaron a la solución nutritiva de Steiner cuatro dosis de Ce a partir de CeCl<sub>3</sub> 7H<sub>2</sub>O: 0, 5, 15 y 25 µM.

Cuarenta y nueve días después de la siembra de bulbos, los tallos florales alcanzaron la etapa de brote comercial (botones florales con tépalos cerrados), y entonces fueron cosechados para la evaluación poscosecha.

### **3.3.2 Tratamientos y diseño experimental**

En poscosecha, se evaluó el efecto de la adición de Ce a la solución nutritiva empleada en el riego, en las cuatro dosis antes referidas. Para lo anterior, los tallos florales cosechados 49 días después de siembra fueron trasladados al laboratorio y etiquetados por tratamiento.

Se empleó un diseño experimental completamente al azar (DECA), con nueve repeticiones por cada tratamiento. La unidad experimental fue un recipiente de vidrio con 250 mL de agua destilada y un tallo floral.

### **3.3.3 Variables evaluadas**

#### **3.3.3.1 Longitud y diámetro de tallo**

La longitud y diámetro de tallo se evaluaron desde el momento del corte (día 0), posteriormente a los 2, 4, 6 y 8 días en florero. La longitud del tallo se midió desde la base del botón floral hasta la terminación del tallo, empleando un flexómetro. El diámetro de tallo se midió en 3 estratos basal, media y superior con un vernier digital (Trupper).

#### **3.3.3.2 Longitud y diámetro del capullo**

Las mediciones se realizaron con un vernier, en el momento de la cosecha y después de 2, 4, 6 y 8 días en florero.

#### **3.3.3.3 Consumo de agua por periodo, peso y porcentaje de masa fresca relativa del tallo floral**

El consumo de agua se determinó a los 2, 4, 6 y 8 días en florero a partir del volumen inicial. El peso del tallo floral se determinó desde el primer día de corte y después a los 2, 4, 6 y 8 días en florero. Para determinar la masa fresca relativa del tallo (MFRT) se empleó la fórmula siguiente descrita por [Chamani \*et al.\* \(2009\)](#): % de masa fresca relativa del tallo floral =  $(W_t/W_{t=0}) \times 100$ ; donde  $W_t$ =peso de tallo en (g) en el día 0, 2, 4, 6, y 8  $W_{t=0}$ = peso del mismo tallo (g) en el día cero.

#### **3.3.3.4 Vida de florero**

Se determinó contabilizando los días transcurridos desde la cosecha de los tallos florales hasta que la flor perdiera su valor ornamental, es decir mayor del 50% de marchitez en los tépalos y pérdida de color de los tépalos.

#### **3.3.3.5 Biomasa fresca y seca por órgano**

Al finalizar la vida de florero, la planta se separó por órganos (tallo, hoja y flor), se procedió a la determinación del peso usando una balanza analítica (Adventurer™ Pro, Ohaus, USA). Las muestras de cada órgano fueron guardadas en bolsas de papel y posteriormente colocadas en una estufa de secado con circulación forzada de aire (Riossa HCF-125, México) a 72 °C por 72 h) para la determinación del peso de la materia seca.

### 3.3.3.6 Contenido nutrimental en flor, hoja y tallo

En cada órgano se realizó análisis de concentración de nutrimentos. Para nitrógeno total, se utilizó el método de Semimicro-Kjeldahl (Bremner, 1965), para lo cual las muestras fueron digeridas con una solución de  $C_7H_6O_3$  al 3.3% en  $H_2SO_4$  concentrado. Las concentraciones de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B fueron determinadas en el extracto resultante de la digestión ácida con  $HNO_3:HClO_4$  (2:1, v:v) (Alcántar y Sandoval, 1999), usando un espectrofotómetro de emisión atómica de inducción atómica por plasma acoplado (ICP-OES 725-ES; Agilent; Santa Clara, CA, USA). Con los resultados de concentración de cada nutrimento por órganos y el peso de materia seca de éstos, se estimó el contenido nutrimental.

### 3.3.3.7 Contenido de azúcares totales

Se estimó la concentración de azúcares en tejido fresco de hojas y flores al final de la vida de florero. Se pesaron 1,000 y 250 mg de hoja y flor respectivamente, posteriormente las muestras se molieron usando nitrógeno líquido. Se empleó el método descrito por Bailey (1958) con antrona ácido sulfúrico y alcohol al 80%. Para cuantificar los azúcares totales, se realizó una curva estándar usando glucosa (Sigma-Aldrich; Saint Louis, MO, EE. UU.). Se midió en una absorbancia de 600 nm en un espectrofotómetro (Genesys™ 10S ThermoFisher Scientific; Waltham, MA, EE. UU.) Considerando las concentraciones de azúcares y el peso de biomasa fresca de hojas y flores por tallo floral, se estimó el contenido de azúcares.

### 3.3.3.8 Contenido de clorofila

El contenido de clorofila se determinó en hojas al final de la vida de florero, según lo descrito por Sumanta *et al.* (2014). La extracción se realizó con acetona al 80%. La absorbancia se midió a 470 nm, 646.8 nm y 663.2 nm en un espectrofotómetro (Genesys™ 10S ThermoFisher Scientific; Waltham, MA, EE. UU.) y las concentraciones se estimaron usando las siguientes fórmulas: Clorofila *a* (Ch *a*;  $\mu g mL^{-1}$ ) =  $12.25(A_{663.2}) - 2.79(A_{646.8})$ ; Clorofila *b* (Ch *b*;  $\mu g mL^{-1}$ ) =  $21.50(A_{646.8}) - 5.10(A_{663.2})$ ; Clorofila total (Ch tot ;  $\mu g mL^{-1}$ ) = Ch *a* + Ch *b* = Carotenoides totales ( $\mu g mL^{-1}$ ) =  $1000(A_{470} - 1.82 Ch a - 85.02 Ch b) / 198$ . Con los valores de concentración de clorofilas y el peso de biomasa fresca de hojas por tallo floral, se estimó el contenido de clorofilas.

### 3.3.3.9 Prolina libre total

La prolina libre total se determinó en hojas y flores al final de la vida florero de acuerdo con el procedimiento descrito por Bates *et al.* (1973). Para ello, se utilizaron

500 200 mg de hoja y flor, respectivamente, que fueron molidos empleando nitrógeno líquido. Luego se realizó una primera extracción macerando las muestras con 5 mL de ácido sulfosalicílico al 3%, y filtrando la muestra con papel de filtro Whatman No. 4. Posteriormente, se mezclaron 2 mL de solución de ninhidrina al 2.5% (p:v) en ácido acético al 60% y ácido fosfórico 6 M (40%), más 2 mL de ácido acético glacial concentrado y 2 mL del extracto de cada muestra. La mezcla se incubó en baño María a 95 °C durante 40 min. La reacción se detuvo colocando las muestras en hielo. Después de la reacción, se añadieron 4 mL de tolueno a cada muestra, se mezclaron brevemente en un vórtex y se incubaron a temperatura ambiente durante 15 min. Para la cuantificación de la prolina, se construyó una curva estándar usando L-prolina ( $400 \text{ nM mL}^{-1}$ ) y la absorbancia correspondiente se midió a 520 nm en un espectrofotómetro (Genesys™ 10S ThermoFisher Scientific; Waltham, MA, EE. UU.). Con los valores de concentración obtenidos y el peso de biomasa fresca de hojas y flores por tallo floral, se estimó el contenido de prolina en cada órgano.

### 3.3.4 Análisis estadístico

Se realizó con los datos obtenidos análisis de varianza y las medias fueron comparadas con la prueba de Tukey con una significancia de  $\alpha=0.05$ . Se empleó el sistema de análisis SAS versión 9.4. ([SAS Institute, 2013](#)).

## 3.4 RESULTADOS

### 3.4.1 Longitud y diámetro de tallo

En general, los tallos de las plantas de tulipán mostraron una tendencia de elongación ascendente a través del tiempo en florero en todos los tratamientos (**Cuadro 4.1**). Sin embargo, los tallos florales presentaron mayor elongación en florero conforme incrementaba la dosis de Ce. De tal manera que, 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentó de forma significativa esta variable respecto al testigo en todas las evaluaciones realizadas; excepto en el día 0 (día de la cosecha de tallos florales). En los días 2, 4, 6 y 8, la longitud de tallo en el tratamiento 15  $\mu\text{M}$  Ce, los aumentos fueron del 10.38, 9.19, 12.00, y 9.70% respectivamente, mientras que en el tratamiento con 25  $\mu\text{M}$  Ce superó al testigo en 14.63, 13.56, 13.83 y 13.95%,

respectivamente, todos en comparación al testigo. Con la dosis 5  $\mu\text{M}$  Ce, los incrementos registrados en la longitud del tallo no fueron diferentes desde el punto de vista estadístico al testigo (**Cuadro 4.1**).

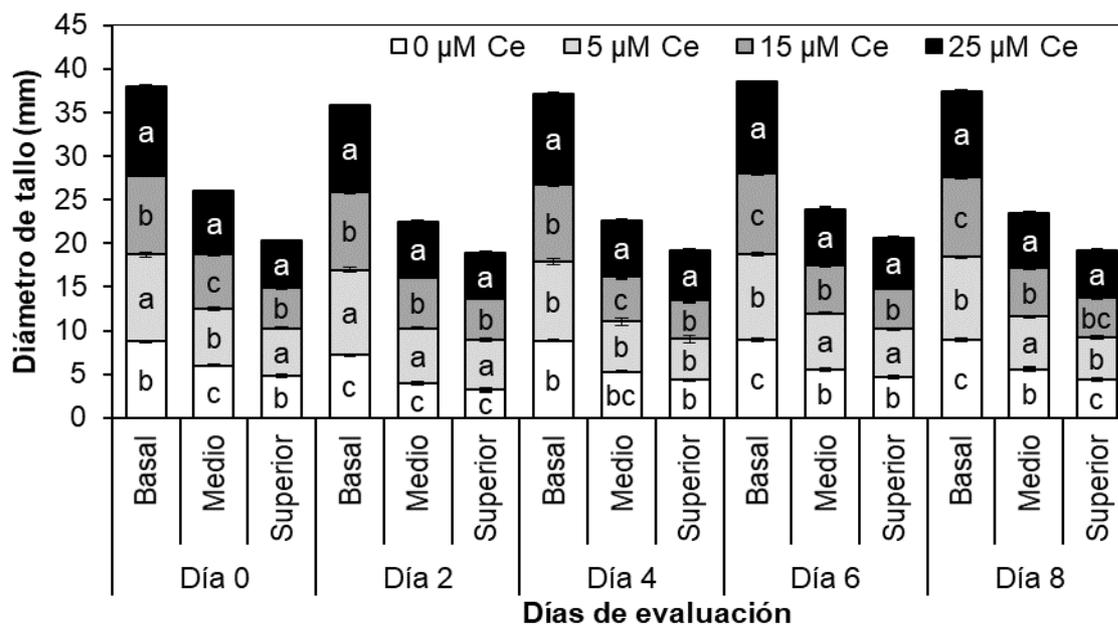
**Cuadro 4.1.** Longitud de tallos de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce vía solución nutritiva en el ciclo productivo.

Ce ( $\mu\text{m}$ )	Longitud de tallo (cm)				
	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8
0	26.40 $\pm$ 2.93 a <sup>z</sup>	36.22 $\pm$ 3.08 b	39.38 $\pm$ 3.70 b	40.32 $\pm$ 3.32 b	41.00 $\pm$ 3.27 b
5	25.38 $\pm$ 2.56 a	38.02 $\pm$ 3.85 ab	41.36 $\pm$ 3.52 ab	43.42 $\pm$ 3.43 ab	43.60 $\pm$ 3.45 ab
15	27.86 $\pm$ 2.13 a	39.98 $\pm$ 2.06 a	43.00 $\pm$ 1.94 ab	45.16 $\pm$ 1.92 a	44.98 $\pm$ 1.99 a
25	28.07 $\pm$ 0.61 a	41.52 $\pm$ 1.05 a	44.72 $\pm$ 1.23 a	45.90 $\pm$ 1. 23 a	46.72 $\pm$ 1.20 a

<sup>z</sup>Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

El diámetro de tallo se midió por estratos; independientemente al tratamiento, el mayor diámetro de tallo se registró en el estrato basal y el menor en el estrato apical, estos resultados están relacionados con la estructura del tallo floral (**Figura 4.1**).

Por otra parte, se advierte al momento del corte (día 0), el efecto positivo de la adición de Ce durante el ciclo productivo a dosis de 5 y 25  $\mu\text{M}$ . La tendencia positiva de estos tratamientos se mantuvo durante la vida en florero. En el día 8, con las dosis de 5  $\mu\text{M}$  se registraron diámetros basal, medio y superior mayores al testigo en 6.4, 7.5 y 11.7%, respectivamente; mientras que, con la dosis 25  $\mu\text{M}$  dichos incrementos fueron de 11.1, 12.4 y 26%, también respecto al testigo. Por otra parte, la dosis 15  $\mu\text{M}$  Ce solo superó al testigo en el valor de los diámetros basal, medio y superior en el día 2 de evaluación (**Figura 4.1**).



**Figura 4.1.** Diámetro de tallos de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada estrato del tallo (basal, medio, superior) y día de evaluación, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

### 3.4.2 Longitud y diámetro del botón floral

La longitud del botón floral de todos los tratamientos evaluados presentó una tasa de elongación creciente entre la fecha del corte y el día 4 en florero, observándose una ligera disminución en el día 6, excepto en los botones florales de plantas tratadas con 15  $\mu\text{M}$  Ce durante el ciclo productivo. En el último día de evaluación (día 8) no se registran datos debido a la abscisión de los tépalos (**Cuadro 4.2**).

**Cuadro 4.2.** Longitud del botón floral de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo.

Ce ( $\mu\text{M}$ )	Longitud de capullo (mm)				
	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8
0	50.32 $\pm$ 2.14 bc	53.55 $\pm$ 3.36 b	60.43 $\pm$ 3.85 b	57.77 $\pm$ 3.37c	--
5	52.85 $\pm$ 4.11 ab	61.53 $\pm$ 6.22 a	67.86 $\pm$ 5.41 a	66.05 $\pm$ 6.22ab	--
15	48.35 $\pm$ 0.99 c	53.168 $\pm$ 1.79 b	60.68 $\pm$ 1.19 b	61.50 $\pm$ 2.17 bc	--
25	55.07 $\pm$ 1.84 a	62.36 $\pm$ 2.45 a	70.48 $\pm$ 2.21 a	69.41 $\pm$ 3.10 a	--

<sup>2</sup>Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

Plantas expuestas a concentraciones de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, tuvieron botones florales de mayor longitud. En el día 0, es decir, al momento de corte, la longitud del botón floral fue significativamente mayor en plantas tratadas con 25  $\mu\text{M}$  Ce, teniendo un aumento respecto al testigo de 9.43%. En los días 2, 4 y 6, los incrementos en la longitud de capullo registrados en el tratamiento 5  $\mu\text{M}$  Ce respecto al testigo fueron de 15.0, 12.3 y 14.3%; mientras que, los aumentos del tratamiento 25  $\mu\text{M}$  Ce fueron de 16.5, 16.6 y 20.1%. El tratamiento 15  $\mu\text{M}$  Ce no tuvo diferencia significativa con el testigo en la longitud de botón floral en poscosecha (**Cuadro 4.2**).

El diámetro del botón floral de todos los tratamientos tuvo un incremento entre los días 0 y 4 en todos los tratamientos; en el día 6, se registró una disminución de esta variable al iniciar la senescencia y abscisión de los tépalos que impidió la evaluación en el día 8 (**Cuadro 4.3**).

**Cuadro 4.3.** Diámetro del botón floral de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la nutritiva durante el ciclo productivo.

Ce ( $\mu\text{M}$ )	Diámetro de capullo (mm)				
	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8
0	16.67 $\pm$ 1.51a <sup>z</sup>	60.22 $\pm$ 4. 70a	73.75 $\pm$ 6. 37a	56.57 $\pm$ 6.37b	--
5	16.67 $\pm$ 0. 96a	52.45 $\pm$ 6.70b	68.97 $\pm$ 7. 17a	56.60 $\pm$ 14.84b	--
15	16.95 $\pm$ 0. 89a	52.67 $\pm$ 4.13b	72.16 $\pm$ 5.06a	56.45 $\pm$ 8.15b	--
25	17.07 $\pm$ 1. 10a	48.75 $\pm$ 3.77b	75.77 $\pm$ 3. 41a	70.81 $\pm$ 4.17a	--

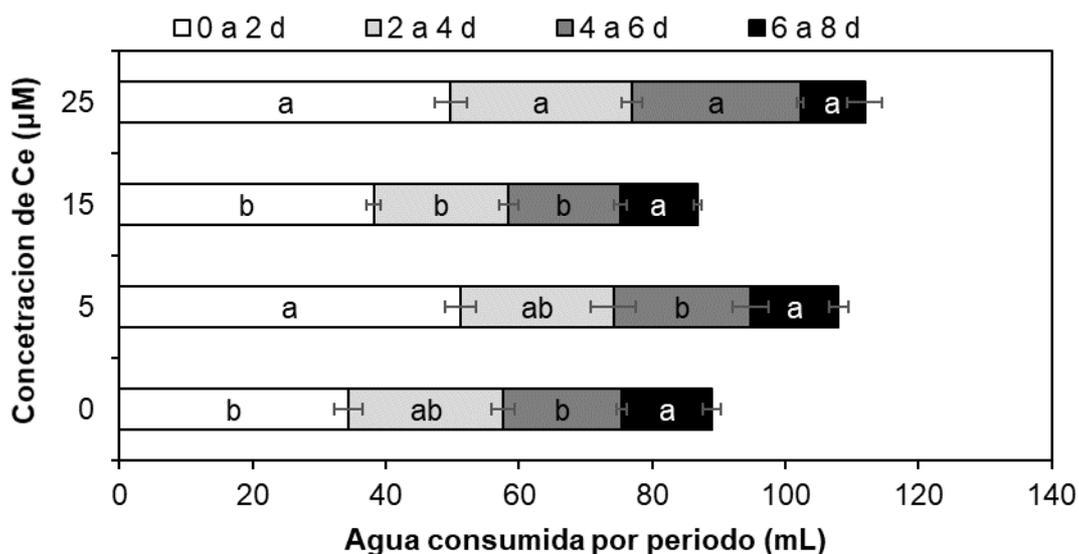
<sup>z</sup>Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

Al corte (día 0) no existieron diferencias en el diámetro de capullo entre tratamientos. En el día 2, el testigo tuvo mayor diámetro de capullo en 12.9, 12.5 y 19.0% que los tratamientos 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, respectivamente. En el día 6 el diámetro del botón floral fue significativamente mayor en las plantas tratadas con 25  $\mu\text{M}$  Ce, superando al testigo en 25.3% (**Cuadro 4.3**).

### 3.4.3 Consumo de agua, peso y masa fresca relativa del tallo floral

En todos los tratamientos el mayor consumo de agua ocurrió en los primeros días de evaluación (día 0-2), observándose una disminución de esta variable a través del tiempo (**Figura 4.2**). Entre el intervalo de 0 a 2 días en florero, las aplicaciones de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentaron de manera significativa el consumo de agua en 48.8 y

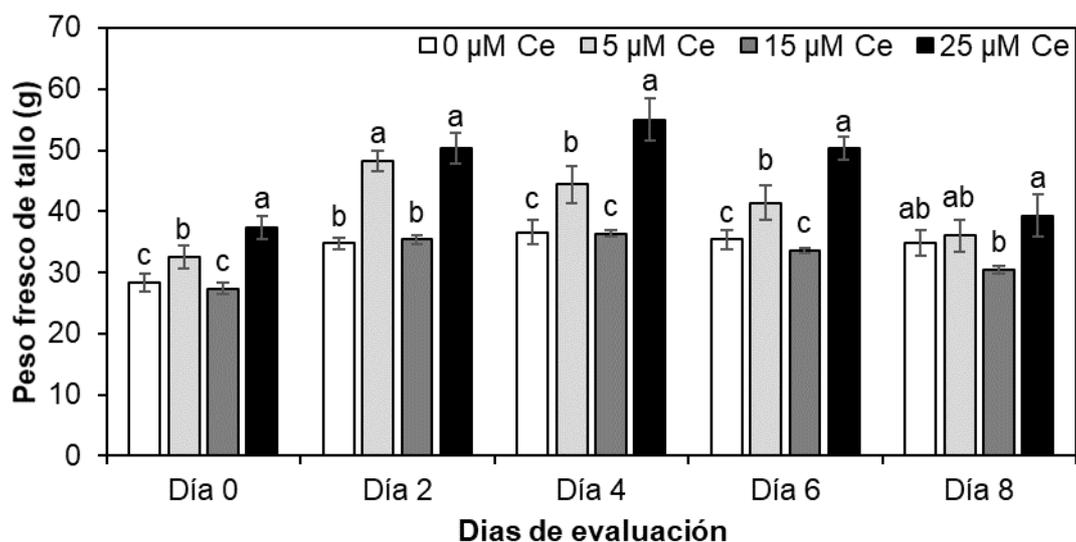
44.6% respectivamente en comparación al testigo; mientras que, en los intervalos de 2 a 4 y de 4 a 6 días solo la concentración de 25  $\mu\text{M}$  Ce provocó un incremento significativo en el consumo de agua de los tallos florales en 17.5 y 25.3% respectivamente, en comparación con el testigo. Al final de la evaluación (intervalo entre días 6 y 8), no se registró diferencia significativa entre los tratamientos evaluados.



**Figura 4.2.** Consumo de agua de tallos florales de tulipán en florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada evaluación, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

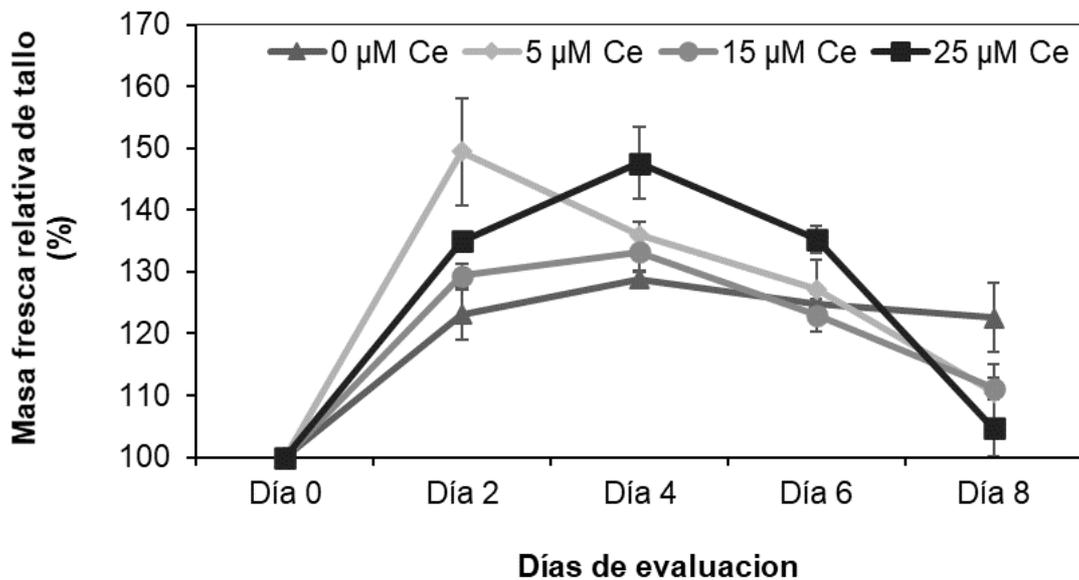
El peso fresco de tallos florales en todas las evaluaciones realizadas presentó diferencia entre tratamientos. Esta variable se incrementó entre los días 0 y 4 en florero; por el contrario, en evaluaciones posteriores, el peso de tallo floral decrece, sin llegar en ningún tratamiento al valor de peso registrado al momento del corte (**Figura 4.3**).

Con la adición de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, se registró un incremento significativo en el peso del tallo floral. En particular, los mayores incrementos respecto al testigo se registraron en las plantas tratadas con 25  $\mu\text{M}$  Ce, éstos del orden de 31.2, 44.5, 50.3, 41.9, y 12.9%, en las evaluaciones realizadas en los días 0, 2, 4, 6 y 8, respectivamente (**Figura 4.3**).



**Figura 4.3.** Peso fresco de tallos florales de tulipán en la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada evaluación, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

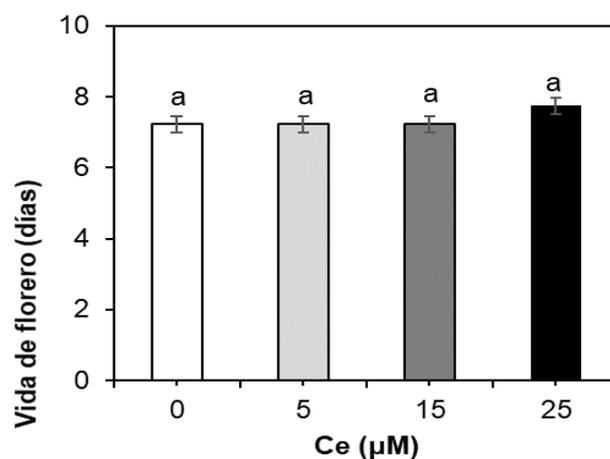
Por otra parte, la masa fresca relativa de tallo en el tratamiento testigo, si bien presentó el menor incremento después de 2 días en florero, en los días posteriores se mantuvo estable. Por el contrario, en los tratamientos con Ce los incrementos relativos en materia fresca del tallo son superiores entre los días 2 y 6 al testigo, particularmente con las dosis 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, pero se reducen drásticamente en el día 8 de la evaluación (**Figura 4.4**).



**Figura 4.4.** Masa fresca relativa de tallos florales de tulipán durante la vida de florero, proveniente de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo.

### 3.4.4 Vida de florero

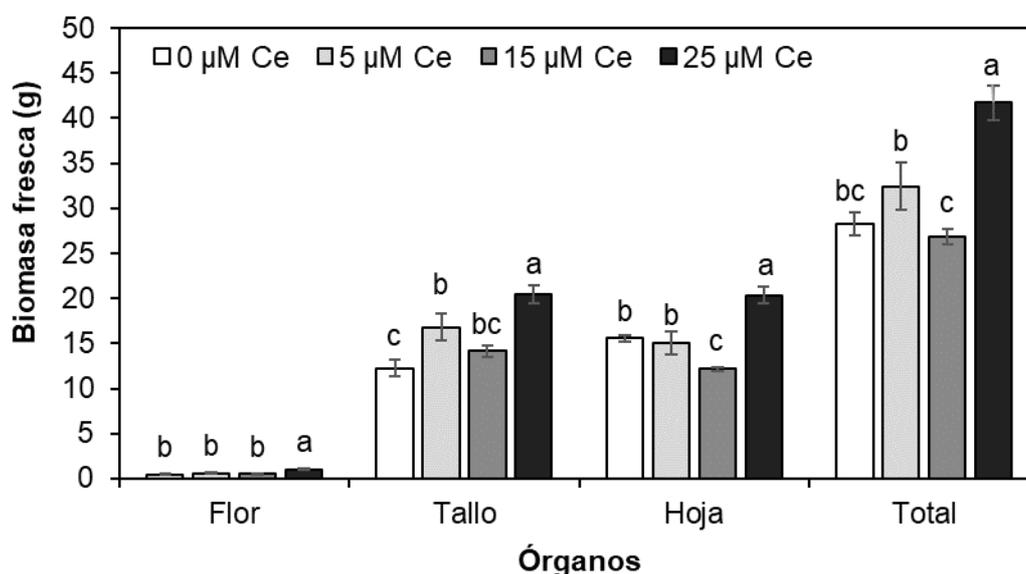
Las diferentes concentraciones de Ce aplicadas a las plantas de tulipán durante el ciclo productivo no tuvieron un efecto significativo en la duración de la vida de florero respecto al testigo, como se observa en la **Figura 4.5**.



**Figura 4.5.** Vida de florero de tallos florales de tulipán, proveniente de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada barra, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). n=9.

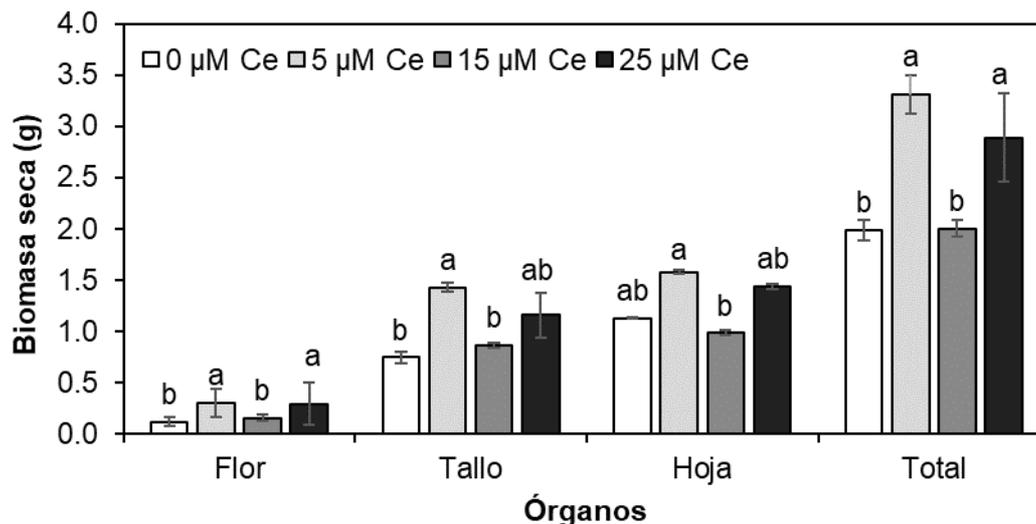
### 3.4.5 Biomasa fresca y seca de los diferentes órganos de tulipán

Las biomasa fresca de los órganos del tallo floral y la total, mostraron diferencias estadísticas entre tratamientos. En flor, el peso fresco registrado en el tratamiento 25  $\mu\text{M}$  Ce superó al testigo en 116.8%. En tallos, los tratamientos con 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce incrementaron la biomasa fresca respecto al testigo en 37.1 y 66.6%, respectivamente. Asimismo, el tratamiento 25  $\mu\text{M}$  Ce incremento el peso de biomasa fresca de hoja en 30.7%, en comparación con el testigo. Por tanto, la biomasa fresca total de los tallos florales fue superior en 25  $\mu\text{M}$  Ce al testigo en 47.6% (**Figura 4.6**).



**Figura 4.6.** Biomasa fresca en diferentes órganos de tulipán y biomasa total al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce vía solución nutritiva. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

Por otra parte, la biomasa seca de flor en los tratamientos 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce superó a la registrada en el testigo en 158.4 y 147.9%, respectivamente. En tallos, se observó un incremento en la biomasa seca de 91.8% en el tratamiento 5  $\mu\text{M}$  Ce respecto al testigo. En la biomasa seca del tallo floral completo, destacan los incrementos causados por los tratamientos 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, éstos del orden de 66.4 y 45.3%, en comparación con el testigo (**Figura 4.7**).



**Figura 4.7.** Biomazas secas de diferentes órganos de tulipán y total al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

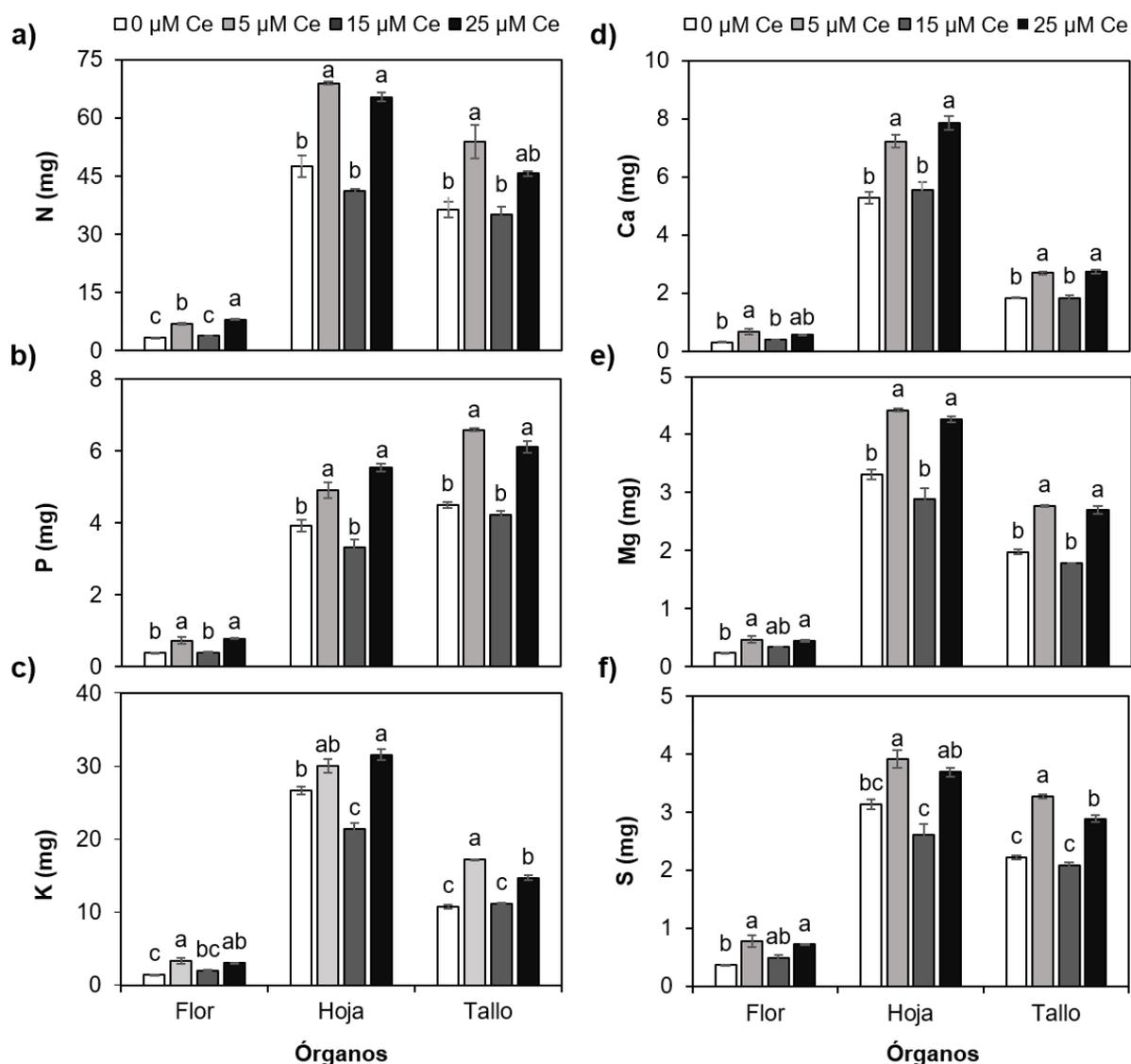
### 3.4.6 Contenido nutrimental en flor, hoja y tallo

Las concentraciones de Ce aplicadas a tulipán durante el ciclo productivo tuvieron efecto significativo en el contenido de macronutrientes en los órganos de tallos florales al final de la vida de florero; asimismo, se observa que el contenido de todos los macronutrientes fue mayor en hojas, excepto el contenido de P que se acumuló más en tallo. Asimismo, en flores, hojas y tallos de tulipán, el contenido de todos los macronutrientes incrementó de manera significativa cuando se adicionaron 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, respecto al testigo (**Figura 4.8**).

El contenido N aumentó con las dosis 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce en 99.1 y 129.7% en flores, en 45.5 y 37.9% en hojas, en 48.3 y 25.77 8% en tallo, en todos los casos respecto al testigo (**Figura 4.8a**).

En el contenido de P se observaron efectos positivos del tratamiento con 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce (**Figura 4.8b**). Estas concentraciones de Ce aumentaron en flores el contenido de P en 87.2 y 100%; en hojas, en 25.3 y 41.3%; y en tallos, en 46.2 y 35.8%.

De la misma manera, 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce incrementaron el contenido de K en flor respecto al testigo en 126.0 y 107.5%; en hoja, en 13.5 y 19.2%; en tallo, en 59.4 y 35.9%. Por el contrario, el tratamiento 15  $\mu\text{M}$  Ce redujo las concentraciones de K en hojas en un 19.7% comparado con el testigo (**Figura 4.8c**).



**Figura 4.8.** Contenido de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) y S (f) en diferentes órganos de tallos florales tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con diferentes letras en cada subfigura y órgano, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=5$ .

Por otra parte, la adición de 5  $\mu\text{M}$  Ce incrementó en 117.1% el contenido de Ca en flor, respecto al testigo. Asimismo, 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce incrementaron el contenido de Ca en hoja en 36.7 y 48.6%; en tallo en 46.6 y 49.2%, todos respecto al testigo (**Figura 4.8d**).

El contenido de Mg en flor registrado con los tratamientos 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce superó al testigo en 97.8 y 88.7% respectivamente; asimismo, en hoja se tuvieron aumentos de 27.9 y 28.9% y en tallo de 40.1 y 36.2% (**Figura 4.8e**).

Finalmente, se registraron también incrementos significativos en el contenido de S en flor con las concentraciones 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, éstas del orden de 110.7y 96.7%

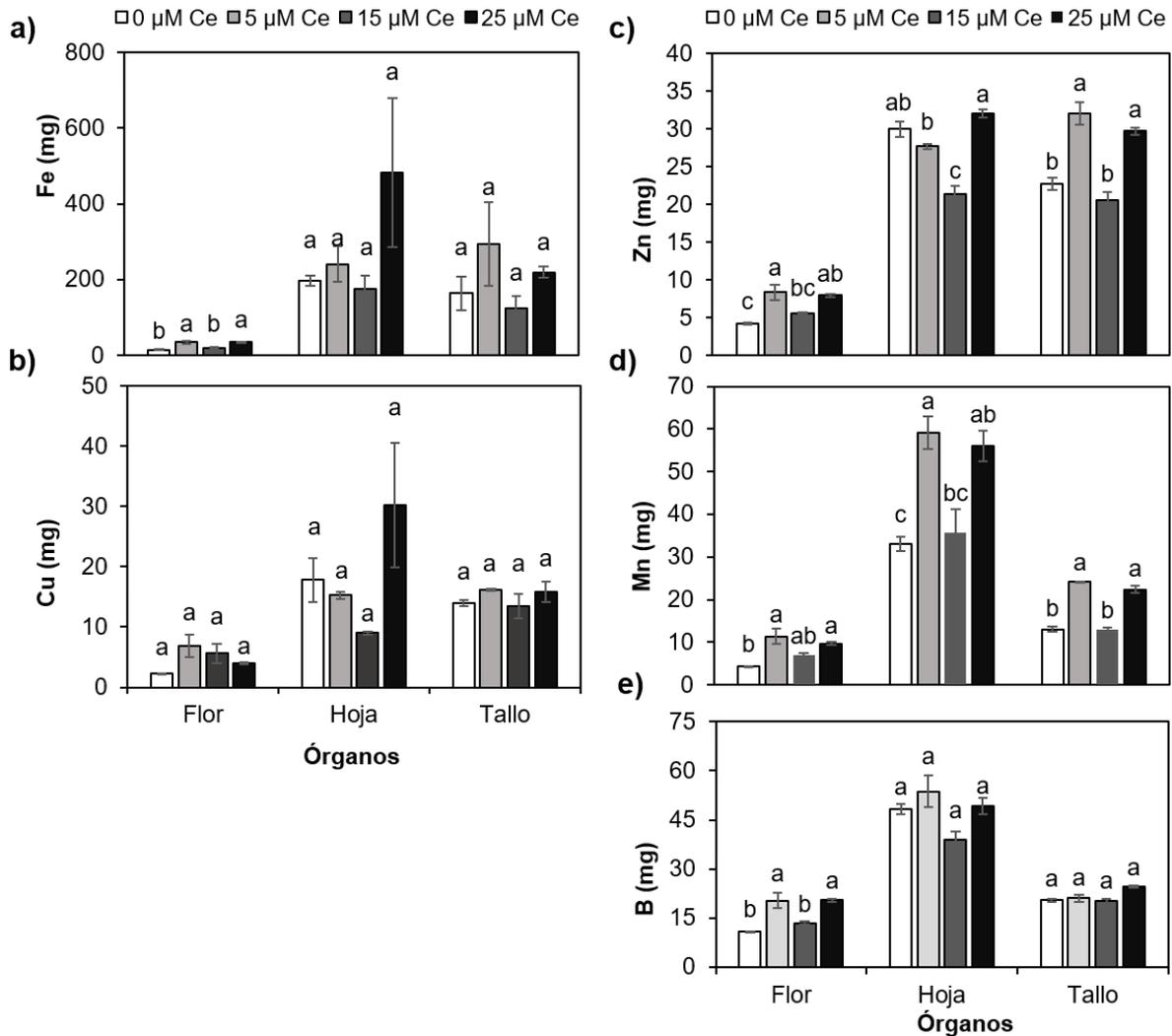
respecto al testigo. En hoja, solo el tratamiento 5  $\mu\text{M}$  Ce aumentó el contenido de S respecto al testigo, superándolo en 24.7%. En tallo, dosis 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentaron el contenido de S en 47.0 y 29.6%, respectivamente, en comparación con el testigo (**Figura 4.8f**).

Por otro lado, solamente las plantas que fueron tratadas con concentraciones de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce presentaron incrementos significativos en el contenido de Fe en flores, éstos de 129.4 y 135.0% respectivamente, en comparación al testigo (**Figura 4.9a**). Los contenidos de Cu en los órganos de tallos florales de tulipán al final de la vida en florero no fueron afectados por los tratamientos con Ce suministrados durante el ciclo productivo como se observa en la **Figura 4.9b**.

El contenido de Zn en flor aumentó en 97.9 y 88.2% con las dosis 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce respecto al testigo. En tallos se observaron las mismas tendencias en el contenido de Zn; es decir, aumentos significativos de 40.7 y 30.5% respecto al testigo, con las dosis de Ce de 5 y 25  $\mu\text{M}$ . Por el contrario, el tratamiento con 15  $\mu\text{M}$  Ce redujo significativamente el contenido de Zn en hoja respecto al testigo, siendo el decremento de 28.9%. (**Figura 4.9c**).

En el contenido de Mn se registraron incrementos significativos en todos los órganos analizados cuando las plantas fueron tratadas con Ce en dosis de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce; en flor los aumentos fueron de 164.7 y 125.3%, respectivamente; en hoja de 79.3 y 69.7% y en tallo de 86.2 y 72.1% (**Figura 4.9d**).

En el caso de los contenidos de B, solo en flores se tuvieron efectos significativos de las dosis de Ce suministradas durante el ciclo productivo; donde las concentraciones 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentaron los contenidos de B en 87.7 y 88.3% (**Figura 4.9e**).

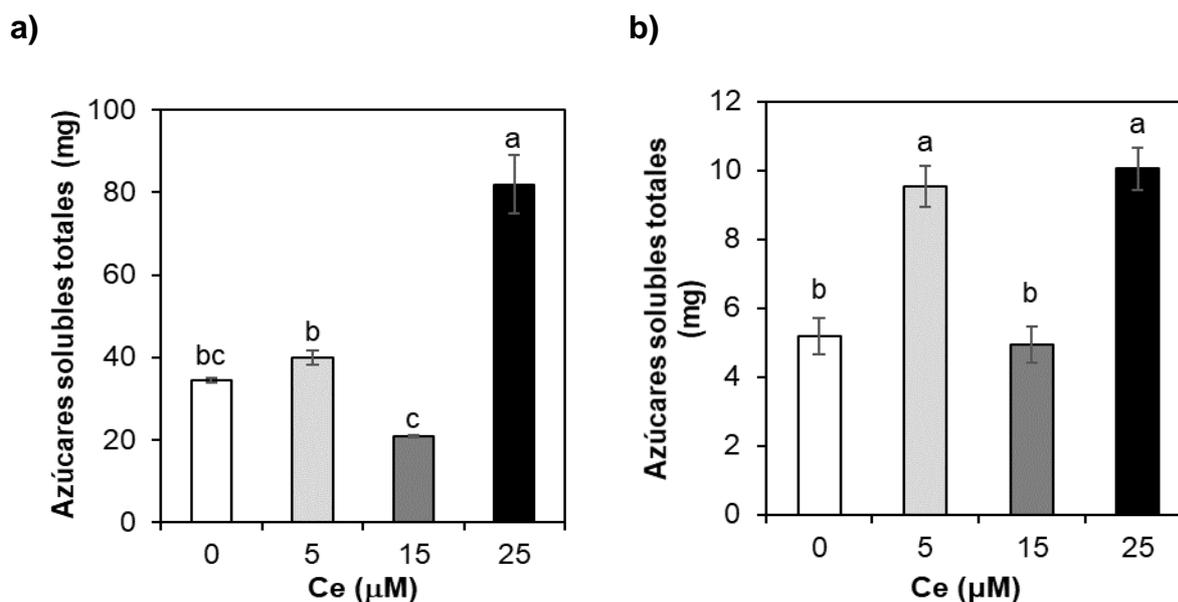


**Figura 4.9.** Contenido de Fe (a), Cu (b), Zn (c), Mn (d) y B (e) en diferentes órganos de tallos florales de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con diferentes letras en cada subfigura y órgano, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=5$ .

### 3.4.7 Contenido de azúcares totales en hojas y flores

En los dos tejidos evaluados (hoja y flor), el mayor contenido de azúcares solubles totales se registró en las hojas (**Figura 4.10**).

En hoja, las diferentes concentraciones de Ce tuvieron un efecto significativo en el contenido de azúcar solubles totales al final de la vida de florero (**Figura 4.10a**). Con la adición de 25  $\mu\text{M}$  Ce se obtuvo el mayor incremento de esta variable superando al testigo en 138.3%, seguido de la concentración 5  $\mu\text{M}$  Ce con un aumento del 16.1%, mientras que 15  $\mu\text{M}$  Ce resultó en la disminución del contenido de azúcares totales en un 39.4% respecto al testigo.



**Figura 4.10.** Contenido de azúcares solubles totales en hoja (a) y flor (b) de tallos florales de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con diferentes letras en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

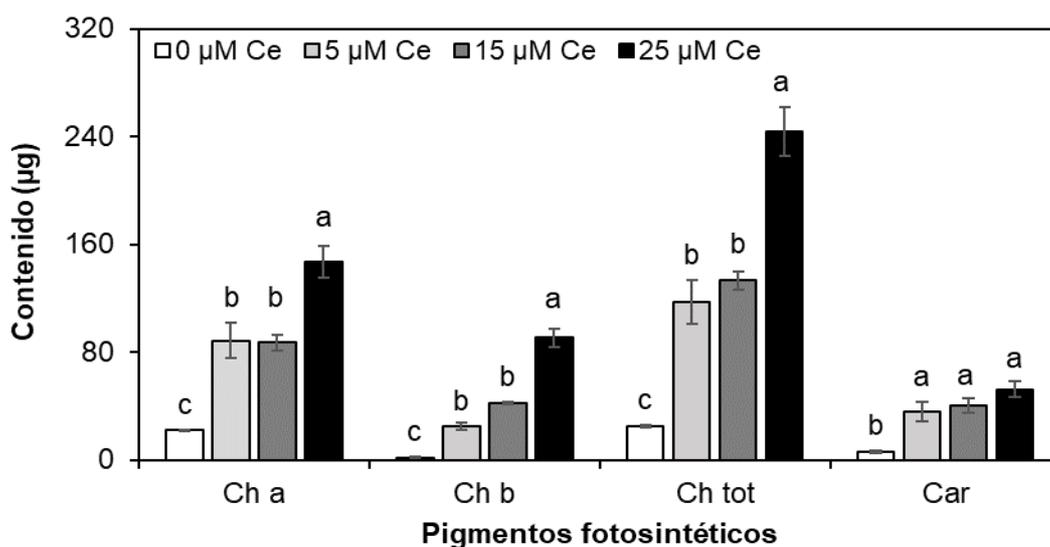
En la flor, concentraciones de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentaron de manera significativa el valor de esta variable respecto al testigo, con incrementos de 84.2 y 94.2% respetivamente (**Figura 4.10b**).

### 3.4.8 Contenido de clorofila

Los contenidos de clorofilas *a*, *b*, total y de carotenoides en hojas, evaluados al final de la vida de florero, se relacionaron de manera positiva con la concentración de Ce aplicado durante el ciclo productivo en la solución nutritiva (**Figura 4.11**).

El contenido de clorofila *a* fue superior en hojas de los tratamientos 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce al testigo en 299.3, 292.8 y 509.1%, respectivamente. Asimismo, el contenido de clorofila *b* en dichos tratamientos fue mayor en aproximadamente 11.7, 20.5 y 45.3 veces, respectivamente, en comparación con el testigo. Por tanto, estas tendencias también se observaron en la clorofila total, con aumentos de 367.3, 430.0 y 870.3% en hojas de los tratamientos con 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, respectivamente, en comparación con el testigo (**Figura 4.11**).

Por otra parte, el contenido de carotenoides fue mayor en 482.0, 550.8 y 748.3% al testigo, en los tratamientos 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, respectivamente (**Figura 4.11**).

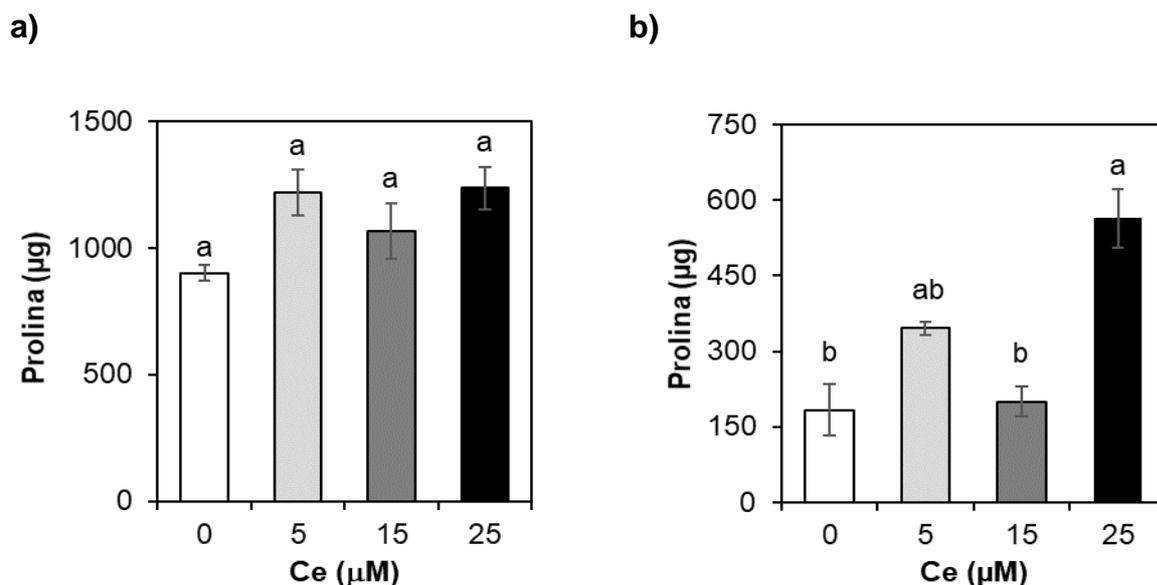


**Figura 4.11.** Contenido de clorofilas *a*, *b*, total y carotenoides en hoja de tallos de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con diferentes letras en cada pigmento indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

### 3.4.9 Contenido de prolina

En el contenido de prolina en hoja no se observaron diferencias significativas entre tratamientos (**Figura 4.12a**).

Por el contrario, en flores, el contenido de este aminoácido se triplicó con la adición de 25  $\mu\text{M}$  Ce, en tanto que 5  $\mu\text{M}$  Ce duplicó el contenido, en ambos casos respecto al testigo (**Figura 4.12b**).



**Figura 4.12.** Contenido de prolina en hojas (a) y flores (b) de tallos florales de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con diferentes letras en cada subfigura indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

### 3.5 DISCUSIÓN

La longitud y diámetro del tallo, además de la longitud y diámetro del botón floral son considerados parámetros que definen la calidad poscosecha de tulipán (Ramírez-Martínez *et al.*, 2009; Trejo-Téllez *et al.*, 2013). Van Doorn *et al.* (2011) al estudiar diferentes cultivares de tulipán encontraron que la mayoría presentaba altas tasas de alargamiento de tallo durante la vida de florero, generalmente ocasionado por el crecimiento del último entrenudo del tallo (Benschop y DeHertogh 1971; Nichols y Kofranek, 1982).

Se ha documentado que los REEs como La mejoran la calidad poscosecha de tulipán (Ramírez-Martínez *et al.*, 2009). En la presente investigación, los resultados muestran que, aplicaciones de dosis de Ce entre 5 y 25 µM en la solución nutritiva usada en el riego de plantas de tulipán durante el ciclo productivo, no tienen efecto significativo en la longitud del tallo floral al momento de corte (día 0) (Cuadro 4.1). Sin embargo, a lo largo de la vida de florero, las plantas que estuvieron expuestas a las dosis más altas de Ce registran un incremento significativo de la longitud de tallo, por lo que se puede decir que, el Ce promovió el aumento de esta variable en poscosecha (Cuadro 4.1). El aumento significativo que provocó el Ce en la longitud de tallo resulta ser una condición indeseable en la calidad poscosecha en tulipán,

dado que éste provoca mayor curvatura de los tallos florales. [Benschop y DeHertogh \(1971\)](#) señalan que, la elongación del tallo, y en particular en el último entrenudo debe ser mínimo, es decir menor a 5 cm.

Por otra parte, el diámetro basal medio y superior de los tallos florales se incrementó de manera significativa con las concentraciones 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, en comparación con el testigo (**Figura 4.1**). [Salgado et al. \(2020\)](#) al aplicar  $72.9 \mu\text{mol Ce}^{3+} \text{L}^{-1}$  en plantas de frijol, reportó un aumento en el diámetro de tallo.

En cuanto a la longitud de botón floral, se observó que todas las concentraciones de Ce incrementaron el valor de esta variable desde el corte y durante la vida en florero (**Cuadro 4.2**). En el caso del diámetro de botón floral, se observó que independientemente a los tratamientos, va aumentando conforme avanza la vida de florero (**Cuadro 4.3**). [Trejo-Téllez et al. \(2013\)](#) reportan al estudiar diferentes variedades de tulipán, que el diámetro de capullo incrementó a través del tiempo y mostró los valores más altos a los 11 días después del corte, disminuyendo a medida que se acerca la senescencia. Por otra parte, en la variable diámetro de capullo existieron diferencias estadísticas entre tratamientos al corte y después de 4 días en florero, mientras que en el día 2 los tallos de plantas tratadas con Ce tuvieron menor diámetro. En la evaluación realizada en el día 6, la mayor dosis de Ce ocasionó mayor incremento de diámetro de botón floral (**Cuadro 4.3**).

El aumento del diámetro y longitud del botón floral durante la vida de florero está relacionado a la expansión y división celular de los pétalos florales, con un marcado aumento de las vacuolas ([Norikoshi et al., 2016a](#); [Norikoshi et al., 2016b](#)). Nuestros resultados muestran que, el diámetro y la longitud de botón tuvieron un crecimiento ascendente a través del tiempo, observándose una disminución en los últimos días de florero (**Cuadros 4.2 y 4.3**). [Ramírez-Martínez et al. \(2009\)](#) reportaron un incremento significativo en el diámetro y longitud de botón floral, al fertirrigar plantas de tulipán con La, un elemento del grupo de las tierras raras. Los resultados que se obtuvieron probablemente se deban a que el Ce promueve la expansión de células en pétalos, al aumentar la concentración de sustancias de osmorregulación en este tejido como prolina y azúcares totales, lo que condujo quizá a que los tallos florales absorbieran más agua y por tanto mayor turgencia en las vacuolas de las células, reflejándose en el aumento de la longitud y diámetro de botón floral. Además, la adición de Ce aumentó el contenido de K en flores que es un ion que contribuye al potencial osmótico ([Hawkesford et al., 2012](#)).

Nuestros hallazgos también pueden ser comparados con lo reportado por [Wang et al. \(2017\)](#), si bien estos autores no midieron estas variables, indican que, la adición de Ce a concentraciones de 10, 30, 50 y 100  $\mu\text{M}$   $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  aumentan de manera considerable el número de flores abiertas en *Rosa chinensis* Jacq.

El aumento del peso fresco de tallos florales (**Figura 4.3**) y en la masa fresca relativa de tallo (**Figura 4.4**) estuvo relacionado con consumo de agua (**Figura 4.2**). La adición de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentó de manera significativa el consumo de agua en los primeros días, mientras que, solo la concentración de 25  $\mu\text{M}$  Ce fue efectiva en los demás días de evaluación, excepto al final de la vida de florero que ningún tratamiento registro diferencias significativas (**Figura 4.2**). De modo que, los tallos florales que consumieron más agua obtuvieron los mayores valores en el peso fresco y MFRT, registrando una disminución en el valor de estas variables a medida que el consumo de agua decreció y los tallos florales perdieron turgencia. Esta misma tendencia fue observada por [Benschop y DeHertogh \(1971\)](#), al estudiar las mismas especies encontraron que, la tasa de absorción de agua ocurría de manera rápida durante las primeras horas y luego tuvo un lento declive, que, después de 5 horas, se volvió una tasa constante. [Trejo-Téllez et al. \(2013\)](#) también al estudiar diferentes variedades de tulipán, reportan un aumento en el peso de la materia fresca del tallo alcanzando sus máximos valores en la mayoría de las variedades a los siete después de corte, misma que disminuyó considerablemente, por el taponamiento de los haces vasculares que afectaron la absorción de agua. Por otra parte, [Gómez-Merino et al. \(2020\)](#) al evaluar 13 cultivares de tulipán, reportan un mayor consumo de agua y aumento en el peso del tallo de la flor, al agregar La en la solución florero.

Es posible que el incremento en el consumo de agua ocasionado por el Ce esté asociado con el incremento en el contenido de prolina en las flores de tulipán (**Figura 4.12b**), dado que este aminoácido funciona como una sustancia osmoregulante ([Hayat et al., 2012](#)). Asimismo, 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce incrementaron la concentración de azúcares en flores (**Figura 4.10b**). Estos hallazgos son apoyados por [Hou et al. \(2018\)](#) quienes señalan que la aplicación de Ce a la solución florero aumenta el contenido relativo de agua en pétalos florales de *lilium* al incrementar el contenido de prolina y azúcares solubles.

La vida de florero es un parámetro que define la calidad de las flores de corte. En tulipán los factores que principalmente afectan la calidad de vida de florero son la

senescencia de los tépalos (Aros *et al.*, 2017). También se ha indicado que la rápida senescencia de las flores de corte está relacionada con el desequilibrio del metabolismo de las especies reactivas de oxígeno (ROS), causando alteración de la membrana plasmática si se tiene sobreacumulación (Alaey *et al.*, 2011; Shan y Zhao, 2015). La duración promedio de la vida de florero del cultivar van Janes en estudio fue de siete días (**Cuadro 4.5**), lo que coincide con lo reportado por Benschop y DeHertogh (1971), quienes indican que la vida en florero puede variar de tan solo entre tres y cuatro días a más de seis días en 77 variedades de tulipán. Sin embargo, estos resultados contrastan con los de Gómez-Merino *et al.* (2020), donde se reporta una vida de florero mayor a 10 días en el mismo cultivar, estos autores señalan, que la variación puede estar asociado con el fondo genético de cada variedad.

Gómez-Merino *et al.* (2020) y Hou *et al.* (2018) documentan que, el mayor consumo de agua se asocia con la mayor prolongación de vida de florero. En este estudio, los resultados muestran que la adición de Ce no mejoró significativamente la vida de florero, al igual se comenta que las flores evaluadas presentaron una abscisión temprana de los tépalos lo que pudo haber limitado la vida de florero (**Cuadro 4.5**). Los resultados aquí obtenidos no coinciden con los de diversos autores quienes señalan que la adición de Ce mejora la vida de florero, en clavel (Zheng y Guo 2018), *lilium* (Hou *et al.*, 2018) y rosa (Wang *et al.*, 2017) al aumentar las actividades de las enzimas antioxidantes, equilibrando el metabolismo reactivo del oxígeno. La diferencia radica entre estas investigaciones con la que se realizó es que en estos autores emplearon directamente el Ce en la solución florero, por tanto, el tallo floral estuvo directamente expuesto al Ce.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran relación positiva entre el incremento en la biomasa fresca, de la longitud de tallo y del consumo de agua. La aplicación de Ce a una dosis de 25  $\mu\text{M}$ , aumentó de manera significativa la biomasa fresca de todos los órganos evaluados y la biomasa fresca total respecto al testigo; en tanto que, la adición de 15  $\mu\text{M}$  Ce produjo que la biomasa fresca de hoja fuera inferior a la del testigo (**Figura 4.6**). Por el contrario, dosis de 5  $\mu\text{M}$  Ce resultó en un aumento significativo la biomasa seca de flor, tallo y total respecto al testigo (**Figura 4.7**). Lo anterior difiere a lo reportado por Liu *et al.* (2012), quienes al adicionar 0.5, 1.0 y 1.5 mM  $\text{Ce}^{3+}$  obtuvieron una disminución significativa de los pesos frescos y secos de las raíces y los brotes de arroz. En trigo, la adición de 10 y 25 mg  $\text{Ce L}^{-1}$

redujo el peso seco de las raíces y brotes (Hu *et al.*, 2002). En cambio, Ramírez-Olvera *et al.* (2018) reportan en arroz un incremento del peso fresco y seco en brotes de arroz con la aplicación de 50  $\mu\text{M}$  Ce.

La nutrición mineral afecta en gran medida el crecimiento y calidad de los cultivos, así también la longitud y el grosor de tallo, el área foliar y la biomasa fresca que repercute en la acumulación de reservas como carbohidratos que son utilizados en el periodo de la vida de florero, también influye en el tamaño de los escapos florales y de particular importancia en la longevidad de las flores (Whitcomb *et al.*, 1980; Khan *et al.*, 2006; Derbyshire *et al.*, 2015). En nuestros hallazgos se observa que, de manera general, el contenido de todos los macronutrientes en flor, hoja y tallo incrementó de manera significativa cuando las plantas fueron tratadas durante el ciclo productivo con 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce (**Figura 4.8**). Resulta interesante observar que el Ce, aumentó en más del 100% el contenido de N, K y Mg en flor (**Figuras 4.8a, 4.8b y 4.8c**). Mientras que, el contenido de los micronutrientes Fe, Zn, Mn y B en flor aumentó de manera significativa en los tratamientos 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, respecto al testigo (**Figuras 4.9a, 4.9c, 4.9d y 4.9e**). Asimismo, en hoja y en tallo, el contenido de Mn aumentó de manera significativa con las dosis 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce en comparación con el testigo (**Figura 4.9d**); en tanto que, el contenido de Zn en hoja disminuyó respecto al testigo, cuando las plantas fueron tratadas con 15  $\mu\text{M}$  Ce (**Figura 4.9c**). Por el contrario, el contenido de Cu no presentó diferencias significativas respecto al testigo con la adición de diferentes concentraciones de Ce (**Figura 4.9b**).

Ramírez-Olvera *et al.* (2018) reportan que diferentes concentraciones de Ce (0, 25, 50 y 100  $\mu\text{M}$ ) en el cultivo de arroz tuvo efectos tanto negativos como positivos en las concentraciones de macro y micronutrientes. En los brotes de arroz, no se tuvieron aumentos significativos en las concentraciones de macronutrientes con la adición de Ce, caso contrario a lo observado en este estudio con los contenidos de macronutrientes. Asimismo, tampoco registraron cambios en la concentración de micronutrientes excepto en la concentración de Zn que incrementó significativamente con la aplicación de 25 y 100  $\mu\text{M}$ . En las raíces, la adición de 50  $\mu\text{M}$  solo aumentó las concentraciones de P y Mg, mientras que la concentración de Ca disminuyó significativamente con dosis de 25 y 50  $\mu\text{M}$  Ce. La concentración de Fe se redujo con dosis 100  $\mu\text{M}$  Ce, mientras que la concentración de Zn disminuyó con 50 y 100  $\mu\text{M}$  Ce.

Los datos obtenidos en esta investigación en contraste con los de [Ramírez-Olvera et al. \(2018\)](#), demuestran que el Ce tuvo un efecto benéfico en el contenido nutrimental de tulipán al aumentar todos los macro y micronutrientes con excepción del Cu, estos resultados son un claro ejemplo de la relación dosis-respuesta fenómeno conocido como hormesis ([Calabrese y Blain, 2011](#)). [Ramírez-Olvera et al. \(2018\)](#) evaluaron dosis de Ce mayores (25-100  $\mu\text{M}$ ), que produjeron pocos efectos positivos; a las evaluadas en esta investigación ( $\leq 25 \mu\text{M}$ ).

[Peralta-Videa et al. \(2014\)](#) documentan que una alta concentración de  $n\text{CeO}_2$  (1000  $\text{mg kg}^{-1}$ ) afectan el valor nutricional de los diferentes órganos de soya. Respecto a macronutrientes, redujo la concentración de Ca, Mg, P en raíz, Ca y Na en vainas, K en nódulos, Na en hoja, mientras que solo aumentó la concentración de P en vainas. En micronutrientes, la concentración de Mo se redujo en tallo y la de Cu en raíz, mientras que incrementó la de Cu en vaina y la de Al en raíz.

En arroz, el tratamiento con diferentes concentraciones de  $\text{Ce}^{3+}$  ocasionó la reducción en las concentraciones de Na, Zn, Cu y Mo en las raíces; mientras que, las de Mn y Fe también en raíces, se incrementaron. Asimismo, la concentración de K y Ca en las raíces fue mayor con una concentración de 0.01 y 0.05 mM Ce comparada al testigo. En brotes, las concentraciones de Cu, Mn y Fe disminuyeron con la exposición de diferentes concentraciones de  $\text{Ce}^{3+}$ . La concentración de K, Mg, Ca, Na, Zn y Mo en los brotes fue mayor con la adición de 0.05 y 0.1 mM Ce y menor con las dosis de 0.5 y 1.0 mM Ce ([Liu et al., 2012](#)).

Por otra parte, en frutos de tomate una dosis de 500  $\text{mg nCeO}_2 \text{ kg}^{-1}$  redujo las concentraciones de B (28%), Fe (78%), Mn (33%) y Ca (59%) comparado al testigo y con la dosis 125  $\text{mg nCeO}_2 \text{ kg}^{-1}$  se redujo la concentración de Al en un 24% ([Barrios et al., 2017](#)). En trigo, dosis de 10 y 25  $\text{mg Ce L}^{-1}$  redujo las concentraciones de Ca, Mg, K, Cu y Zn en raíz y brote ([Hu et al., 2002](#)). Por lo que se puede decir que el Ce puede alterar el metabolismo de los macro y micronutrientes dependiendo de la especie de cultivo.

En lo que respecta al contenido de azúcares, en esta investigación se observó que, plantas tratadas con 25  $\mu\text{M}$  Ce tuvieron el mayor incremento en el contenido de azúcares solubles totales en hojas; mientras que, la dosis 15  $\mu\text{M}$  Ce resultó en la disminución de esta variable (**Figura 4.10a**). En flor, los tratamientos 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentaron de manera significativa el contenido de azúcares solubles totales (**Figura 4.10b**). Esta misma tendencia se observó en pétalos de *lilium*, donde la

adición de 40  $\mu\text{M}$  nitrato de cerio a la solución florero aumentó de manera importante el contenido de azúcares solubles (Hou *et al.*, 2018). En hojas de soya, una dosis de 20  $\text{mg Ce}^{3+} \text{ L}^{-1}$  incrementó en más de 7.7% el contenido de azúcar solubles respecto al testigo (Mao *et al.*, 2012). De la misma manera, en vástagos de arroz diferentes dosis de Ce aumentaron las concentraciones de azúcares solubles totales (Ramírez-Olvera *et al.*, 2018).

Los pigmentos como la clorofila y los carotenoides son determinantes clave del desarrollo, apariencia y la calidad poscosecha (Solovchenko *et al.*, 2018). Existe una estrecha relación entre el contenido de los pigmentos fotosintéticos y la vida útil de las flores de corte, ya que la senescencia conduce a la degradación de los pigmentos fotosintéticos especialmente para la clorofila *a* y *b* (Shan y Zhao, 2015; Hou *et al.*, 2018). Por tanto, mantener por más tiempo el verdor de las hojas y aumentar el contenido de los pigmentos fotosintéticos es un rasgo deseable para aumentar la vida de florero. En este estudio, las plantas de tulipán que fueron tratadas durante el ciclo productivo con las diferentes concentraciones de Ce, tuvieron mayor contenido de clorofilas *a*, *b*, total y carotenoides; es decir, los contenidos de pigmentos fotosintéticos se relacionan de manera positiva con la concentración de Ce suministrada a las plantas con la solución nutritiva (**Figura 4.11**). El aumento de la clorofila en plantas superiores tratadas con algunos elementos del grupo de las REEs ha sido reportado en otras investigaciones. Hou *et al.* (2018), al adicionar 40  $\mu\text{M Ce}(\text{NO}_3)_3$  a la solución florero de liliun, obtuvieron aumentos notables en las concentraciones foliares de clorofilas *a* y *b*, y de carotenoides; éstos de 66.2, 62.2 y 63.5% respectivamente, en comparación con el testigo. En cálices de *Rosa chinensis Jacq.*, Wang *et al.* (2017) reportan también incrementos en las concentraciones de clorofilas *a* y *b* y de carotenoides con el suministro 30  $\mu\text{M Ce}(\text{NO}_3)_3$  en la solución florero respecto al testigo, éstos del orden de 54.1, 55.1 y 62.5%, respectivamente. Por el contrario, la adición de altas concentraciones de Ce (100  $\mu\text{M}$ ) en forma  $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en brotes de arroz con 26 días de edad, disminuyó de manera significativa la concentración de clorofilas *a*, *b* y total (Ramírez-Olvera *et al.*, 2018).

La prolina (ácido pirrolidin-2-carboxílico) es un aminoácido proteinogénico, juega un papel altamente beneficioso en las plantas expuestas a diversas condiciones de estrés. Además de actuar como un excelente osmolito, la prolina desempeña tres funciones principales durante el estrés, es decir, como un quelante de metales, una

molécula de defensa antioxidante y una molécula de señalización (Szabados y Savouré, 2010; Hayat *et al.*, 2012). En el presente estudio, se muestra que, las plantas tratadas con diferentes dosis de Ce no tuvieron un incremento significativo en el contenido de prolina en hojas respecto al testigo (**Figura 4.12a**); mientras que, en flores, el contenido de este aminoácido se triplicó con la adición de 25  $\mu\text{M}$  Ce durante el ciclo productivo (**Figura 4.12b**). Estos efectos son respaldados con lo reportado por Hou *et al.* (2018), quienes al aplicar 40  $\mu\text{M}$  nitrato de cerio a la solución florero, reportan un incremento en el contenido de prolina en pétalos de *lilium* (23.7  $\mu\text{g g}^{-1}$  PF) que supera al testigo en más del 100%. En plantas de *Vigna unguiculata* L. Walp, con dosis de 89.206 y 446.030  $\mu\text{M}$  Ce se tuvieron las concentraciones máximas de prolina en hojas (7.70 y 8.40  $\mu\text{moles g}^{-1}$  respectivamente), superando al testigo en un 14.92 y 25.37% respectivamente, en tanto que una concentración de 17.87  $\mu\text{M}$  redujo el contenido de este aminoácido en 26.86% en comparación con el testigo (Shyam y Aery, 2012). En plantas acuáticas (*Hydrilla verticillata*), 10  $\mu\text{M}$  redujo ligeramente la concentración de prolina y luego aumentó con concentraciones más altas (100  $\mu\text{M}$ ) (Wang *et al.*, 2007).

### 3.6 CONCLUSIÓN

La aplicación de Ce tiene influencia positiva en la calidad poscosecha de tulipán al mejorar parámetros como el diámetro y longitud de botón, aumentar el diámetro de tallo, consumo de agua y mantener por más tiempo la masa fresca relativa de tallo, mejorar el contenido tanto de macro como de micronutrientes en flor, hoja y tallo, además de incrementar el contenido de biomoléculas como prolina, azúcares solubles totales y pigmentos fotosintéticos, pero no incrementó la duración de la vida de florero de esta especie.

Los mejores resultados se obtuvieron con las concentraciones de 5 y 25  $\mu\text{M}$ , sin embargo, se sugieren más estudio para encontrar una concentración que mejore la vida de florero.

### 3.7 LITERATURA CITADA

Alaey M, Babalar M, Naderi R, Kafi M. 2011. Effect of pre-and postharvest salicylic acid treatment on physio-chemical attributes in relation to vase-life of rose cut flowers. *Postharvest Biology and Technology* 61(1): 91-94. doi: 10.1016/j.postharvbio.2011.02.002

- Alcántar GG, Sandoval VM. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. Chapingo, México, 10 156 p.
- Amiri A, Kafi M, Kalate-Jari S, Matinzadeh M, Karaj I. 2018. Tulip response to different light sources. *Journal of Animal and Plant Science* 28(2): 539-545.
- Aros D, Orellana K, Escalona V. 2017. Modified atmosphere packaging as a method to extend postharvest life of tulip flowers. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 45(3): 202-215. doi: 10.1080/01140671.2017.1296872
- Bailey RW. 1958. The reaction of pentoses with anthrone. *Biochemical Journal* 68(4): 669-672. doi: 10.1042/bj0680669
- Barrios AC, Medina-Velo IA, Zuverza-Mena N, Dominguez OE, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey 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: 100-107. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.04.017
- Bates LS, Waldren RP, Teare ID. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39: 205-207. doi: 10.1007/BF00018060
- Benschop M, DeHertogh AA. 1971. Post-harvest development of cut tulip flowers<sup>1</sup>. *Acta Horticulturae* 23: 121-126. doi: 10.17660/ActaHortic.1971.23.18
- Bobadilla SE, Chimenti C. 2013. Effects of boron on bulb production and flower quality of tulip cv. Rococo grown in pots. *Horticultura Argentina* 32(78): 30-38.
- Bremner J M. 1965. Total nitrogen. In: Black CA (ed.). *Methods of soil analysis. Part. 2. Agronomy 9*. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, U. S. A. pp. 1049-1178.
- Byczyńska A, Zawadzińska A, Salachna P. 2019. Silver nanoparticles preplant bulb soaking affects tulip production. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B —Soil and Plant Science* 69(3): 250-256. doi: 10.1080/09064710.2018.1545863
- Calabrese EJ, Blain RB. 2011. The hormesis database: the occurrence of hormetic dose responses in the toxicological literature. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 61(1): 73-81. doi: 10.1016/j.yrtph.2011.06.003
- Chamani E, Arshad M, Pourbeyrami Y. 2009. Response of various cut lisianthus cultivars to silver thiosulfate treatment. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 7(2): 746-748.
- 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
- Derbyshire G, Hoffman EW, Kempen E. 2015. The role of nutrient solution composition on the uptake of nutrients, growth and vase life of tulips grown hydroponically under South African conditions. *South African Journal of Plant and Soil* 32(3):129-137. doi: 10.1080/02571862.2015.1006273

- Ferrante A, Tognoni F, Mensuali-Sodi A, Serra G. 2003. Treatment with thidiazuron for preventing leaf yellowing in cut tulips and chrysanthemum. *Acta Horticulturae* 624: 357-363. doi: 10.17660/ActaHortic.2003.624.49
- Gómez-Merino FC, Ramírez-Martínez M, Castillo-González AM, Trejo-Téllez LI. 2020. Lanthanum prolongs Vase Life of cut tulip flowers by increasing Water consumption and concentrations of Sugars, proteins and chlorophylls. *Scientific Reports* 10: 4209. doi: 10.1038/s41598-020-61200-1
- Hawkesford M, Horst W, Kichey T, Lambers H, Schjoerring J, Møller IS, White, P. 2012. Functions of Macronutrients. In: Marschner P (ed.). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition*. Elsevier Inc. pp. 135-189. doi: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6
- Hayat S, HayatQ, Alyemeni MN, Wani AS, Pichtel J, Ahmad A. 2012. Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signaling & Behavior* 7(11): 1456-1466. doi: 10.4161/psb.21949
- He YW, Loh CS. 2000. Cerium and lanthanum promote floral initiation and reproductive growth of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science* 159(1): 117-124. doi: 10.1016/S0168-9452(00)00338-1
- Hewitt EJ, Miles P. 1954. The effects of deficiencies and excesses of some mineral nutrients on the growth of tulip and daffodil bulbs in sand culture. *Journal of Horticultural Science* 29(4): 237-244. doi: 10.1080/00221589.1954.11513816
- Hong F, Qu C, Wang L. 2017. Cerium improves growth of maize seedlings via alleviating morphological structure and oxidative damages of leaf under different stresses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 65(41): 9022-9030. doi: 10.1021/acs.jafc.7b03398
- Hou K, Bao D, Shan C. 2018. Cerium improves the vase life of *Lilium longiflorum* cut flowers through ascorbate-glutathione cycle and osmoregulation in the petals. *Scientia Horticulturae* 227: 142-145. doi: 10.1016/j.scienta.2017.09.040
- 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(6): 621-629. doi: 10.1016/S0045-6535(02)00109-1
- Hu Z, Haneklaus S, Sparovek G, Schnug E. 2006. Rare earth elements in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37(9-10): 1381-1420. doi: 10.1080/00103620600628680
- Ikarashi T, Baba A. 1977. Studies on the physiological disorder, so-called "Ironuke" and "Kubiore" in tulip plants. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* 46(1): 81-90. doi: 10.2503/jjshs.46.81
- Li J, Hong M, Yin X, Liu J. 2010. Effects of the accumulation of the rare earth elements on soil macrofauna community. *Journal of Rare Earths* 28(6): 957-964. doi: 10.1016/S1002-0721(09)60233-7
- Kamenetsky R. 2005. Production of flower bulbs in regions with warm climates. *Acta Horticulturae* 673: 59-66. doi: 10.17660/ActaHortic.2005.673.4

- Khan FU, Jhon AQ, Khan FA., Mir MM. 2006. Effect of NPK and Zn on growth, flowering and bulb production in tulip under polyhouse conditions in Kashmir. *Journal of Horticultural Sciences* 1(2): 129-134.
- Kotelnikova A, Fastovets I, Rogova O, Volkov DS, Stolbova V. 2019. Toxicity assay of lanthanum and cerium in solutions and soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 167: 20-28. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.117
- 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
- Mao CX, Chen MM, Wang L, Zou H, Liang CJ, Wang LH, Zhou Q. 2012. Protective effect of cerium ion against ultraviolet B radiation-induced water stress in soybean seedlings. *Biological Trace Element Research* 146(3): 381-387. doi: 10.1007/s12011-011-9264-x
- Nayeem M, Qayoom A. 2015. Design of micro climatic environmental conditions inside greenhouses for cultivation of tulip flowers. *Journal of Applied Engineering* 3(1): 202-210.
- Nelson PV, Niedziela JrCE. 1998a. Effects of calcium source and temperature regime on calcium deficiency during hydroponic forcing of tulip. *Scientia Horticulturae* 73(2-3): 137-150. doi: 10.1016/S0304-4238(97)00157-X
- Nelson PV, Niedziela JrCE. 1998b. Effect of ancymidol in combination with temperature regime, calcium nitrate, and cultivar selection on calcium deficiency symptoms during hydroponic forcing of tulip. *Scientia Horticulturae* 74(3): 207-218. doi: 10.1016/S0304-4238(97)00158-1
- Nichols R, Kofranek AM. 1982. Reversal of ethylene inhibition of tulip stem elongation by silver thiosulphate. *Scientia Horticulturae* 17(1): 71-79. doi: 10.1016/0304-4238(82)90063-2
- Norikoshi R, Shibata T, Ichimura K. 2016a. Cell division and expansion in petals during flower development and opening in *Eustoma grandiflorum*. *The Horticulture Journal* 85(2): 154-160. doi: 10.2503/hortj.MI-071
- Norikoshi R, Shibata T, Niki T, Ichimura K. 2016b. Sucrose treatment enlarges petal cell size and increases vacuolar sugar concentrations in cut rose flowers. *Postharvest Biology and Technology* 116: 59-65. doi: 10.1016/j.postharvbio.2016.01.003
- Pang X, Li D, Peng A. 2002. Application of rare-earth elements in the agriculture of China and its environmental behavior in soil. *Environmental Science and Pollution Research* 9(2): 143-148.
- Peralta-Videa JR, Hernandez-Viezcas JA, Zhao L, Diaz BC, Ge Y, Priester JH, Holden PA, Gardea-Torresdey JL. 2014. Cerium dioxide and zinc oxide nanoparticles alter the nutritional value of soil cultivated soybean plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 80: 128-135. doi: 10.1016/j.plaphy.2014.03.028
- Ramírez-Martínez M, Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI, Hernández I, Osorio B, Castillo AM, Hernández E. 2009. Effect of lanthane on quality of tulip flower 'Ile de France'. *Acta Horticulturae* 847: 295-300. doi: 10.17660/ActaHortic.2009.847.39

- Ramírez-Olvera SA, Trejo-Téllez LI, García Morales S, Pérez-Sato A, Gómez-Merino FC. 2018. Cerium enhances germination and shoot growth, and alters mineral nutrient concentration in rice. *PLoS ONE* 13(3): e0194691. doi: 10.1371/journal.pone.0194691
- Ramos SJ, Dinali GS, Oliveira C, Martins GC, Moreira CG, Siqueira JO, Guilherme LR. 2016. Rare earth elements in the soil environment. *Current Pollution Reports* 2(1): 28-50. doi: 10.1007/s40726-016-0026-4
- Reid MS, Jiang CZ. 2012. Postharvest biology and technology of cut flowers and potted plants. *Horticultural Reviews* 40: 1-54. doi: 10.1002/9781118351871.ch1
- SADER. 2020. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), delegación Ciudad de México. Disponible en línea en: <https://www.gob.mx/agricultura/cdmx/articulos/floricultura-en-la-ciudad-de-mexico?idiom=es>. Consultado: abril 2020.
- Salgado OGG, Teodoro JC, Alvarenga JP, de Oliveira C, de Carvalho TS, Domiciano D, Marchiori PER, Guilherme LRG. 2020. Cerium alleviates drought-induced stress in *Phaseolus vulgaris*. *Journal of Rare Earths* 38(3): 324-331. doi: 10.1016/j.jre.2019.07.014
- SAS Institute. 2013. Base SAS 9.4. Procedures Guide: Statistical Procedures Second edition. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 500 p.
- Shan C, Zhao X. 2015. Lanthanum delays the senescence of *Lilium longiflorum* cut flowers by improving antioxidant defense system and water retaining capacity. *Scientia Horticulturae* 197: 516-520. doi: 10.1016/j.scienta.2015.10.012
- 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. doi: 10.4067/S0718-95162012000100001
- Solovchenko A, Yahia EM, Chen C. 2018. Pigments. In: Yahia A (ed.). *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables* Elsevier. pp. 225-252. doi: 10.1016/B978-0-12-813278-4.00011-7
- Steiner AA. 1984. The universal nutrient solution. In: *Proceedings Sixth International Congress on Soilless Culture, ISOSC*. Lunteren, Wageningen, The Netherlands, pp. 633-650.
- Sumanta N, Haque CI, Nishika J, Suprakash R. 2014. Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvents. *Research Journal of Chemical Sciences* 4(9): 63-69.
- Szabados L, Savouré A. 2010. Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science* 15(2): 89-97. doi: 10.1016/j.tplants.2009.11.009
- Trejo-Téllez LI, Ramírez-Martínez M, Gómez-Merino FC. 2013. Caracterización de cultivares de tulipán (*Tulipa gesneriana* L.) en postcosecha. *AgroProductividad* 6(3): 29-36.
- USDA, NRCS. 2020. The PLANTS Database. National Plant Data Team, Greensboro, NC 27401-4901 USA. Disponible en línea en: <http://plants.usda.gov>. Consultado: marzo 2020.

- Van Doorn WG, Perik RR, Abadie P, Harkema H. 2011. A treatment to improve the vase life of cut tulips: Effects on tepal senescence, tepal abscission, leaf yellowing and stem elongation. *Postharvest Biology and Technology* 61(1): 56-63. doi: 0.1016/j.postharvbio.2011.02.003
- Wang Q, Mu J, Shan C, Wang W, Fu S. 2017. Effects of cerium on the antioxidant defence system in the petals and the contents of pigments in the calyces of *Rosa chinensis* Jacq. cut flower. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 92(6): 630-635. doi: 10.1080/14620316.2017.1338924
- Wang X, Shi GX, Xu QS, Xu BJ, Zhao J. 2007. Lanthanum-and cerium-induced oxidative stress in submerged *Hydrilla verticillata* plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 54(5): 693-697. doi: 10.1134/S1021443707050184
- Whitcomb CE, Storjohann A, Warde WD. 1980. Micromax-micronutrients for improved plant growth. *Combined Proceedings International Plant Propagators' Society* 30: 462-467.
- Yang F, Ma ZN, Liu C, Wu C, Zhou J, Gao FQ, Hong FS. 2005. Effects of Ce<sup>3+</sup> on chloroplast senescence of spinach under light. *Journal of Rare Earths* 23(4): 480-485.
- Zhao H, Zhou Q, Zhou M, Li C, Gong X, Liu C, Gong X, Liu C, Qu C, Wang L, Si W, Hong F. 2012. Magnesium deficiency results in damage of nitrogen and carbon cross-talk of maize and improvement by cerium addition. *Biological Trace Element Research* 148(1): 102-109. doi: 10.1007/s12011-012-9340-x.
- Zheng M, Guo Y. 2018. Cerium improves the vase life of *Dianthus caryophyllus* cut flower by regulating the ascorbate and glutathione metabolism. *Scientia Horticulturae* 240: 492-495. doi: 10.1016/j.scienta.2018.06.046
- Zhou M, Gong X, Ying W, Chao L, Hong M, Wang L, Fashui H. 2011. Cerium relieves the inhibition of chlorophyll biosynthesis of maize -caused by magnesium deficiency. *Biological Trace Element Research* 143: 468-477. doi: 10.1007/s12011-010-8830-y

## **CAPÍTULO IV. APLICACIÓN FOLIAR DE CERIO EN TULIPÁN (*Tulipa gesneriana* L.) DURANTE EL CICLO PRODUCTIVO: EFECTO EN LA CALIDAD POSCOSECHA**

### **4.1 RESUMEN**

Se estudió el efecto de la aplicación de Ce vía foliar durante el ciclo productivo en la calidad poscosecha y vida de florero de tulipán cv. Jan van Nes. Las evaluaciones se realizaron en tallos florales de tulipanes, cosechados en etapa de brote comercial (49 días después de siembra) y obtenidos de bulbos comerciales, que fueron cultivadas bajo condiciones de malla sombra, durante el periodo otoño-invierno. Se asperjaron soluciones de cloruro de Ce ( $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) a 0, 5, 15 y 25  $\mu\text{M}$  en las hojas de tulipán con intervalos de 15 días (2 aplicaciones durante el ciclo productivo). Los resultados muestran que, las concentraciones de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce causaron reducciones en la longitud de tallo al momento de corte, mientras que, en el periodo de poscosecha (día 4) 25  $\mu\text{M}$  Ce provocó una considerable elongación de tallo; por otro lado, el diámetro de tallo de los tres estratos evaluados fue menor en las plantas tratadas con 5 y 15  $\mu\text{M}$  Ce, mientras que a lo largo de la vida de florero el diámetro de tallo presenta comportamiento muy dinámico. La longitud del botón floral fue mayor en las plantas asperjadas con 15  $\mu\text{M}$  Ce, en tanto que Ce tuvo un efecto nulo en el diámetro de botón al momento de corte; durante la vida poscosecha 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce causaron reducciones en la longitud y diámetro de botón floral. El consumo de agua no mejoró en las plantas tratadas con Ce, excepto en los primeros 2 días en florero, lo que se relaciona a la corta vida de florero. El mayor peso fresco de tallo se registró con el tratamiento 25  $\mu\text{M}$  Ce y menor con 15  $\mu\text{M}$ . Una concentración alta de Ce presentó efectos beneficiosos en el peso de la biomasa fresca de flor, hoja, y biomasa seca, por el contrario, causó reducciones en el peso de la biomasa seca de flor. Las aplicaciones foliares de Ce benefician el contenido nutrimental de los órganos evaluados; excepto en la flor, Ce impide la traslocación de todos los macronutrientes en este órgano. El contenido de azúcares solubles totales, pigmentos fotosintéticos en hoja y el contenido de prolina en flor aumentó de manera significativa con el tratamiento 25  $\mu\text{M}$  Ce; mientras que 15  $\mu\text{M}$  Ce redujo estas biomoléculas. En conclusión, la aplicación foliar de Ce durante el ciclo productivo tiene efectos tanto positivos como negativos en los

parámetros de calidad poscosecha, contenido nutrimental y de algunas biomoléculas, sin presentar mejoras en la vida de florero de tulipán.

## 4.2 INTRODUCCIÓN

El tulipán (*Tulipa gesneriana*) una geófito ornamental (Kamenetsky y Okubo, 2013), ocupa el lugar número 3 de las flores más comercializadas en todo el mundo (Royal FloraHolland, 2016), esta especie es usada como flor de corte, plantas de maceta, material propagativo, así como en las áreas de paisajismo y jardinería.

En México, su producción se realiza casi exclusivamente en la Ciudad de México debido a que el cultivo se adapta a zonas frías y templadas; en 2018, su producción generó más de 9 millones de pesos con tan solo 2.4 ha sembradas (SIAP, 2018).

En otro punto, se conoce que para completar satisfactoriamente el ciclo de vida de una planta se requiere de elementos esenciales que se clasifican en macro y micronutrientes (Alcántar-González *et al.*, 2016); sin embargo, existen otros elementos no esenciales, o esenciales solo para ciertas especies, y que tienen efectos beneficiosos para las plantas, son conocidos como “elementos benéficos”. Hasta la fecha se han reconocido diez elementos benéficos incluidos aluminio (Al), cerio (Ce), cobalto (Co), yodo (I), sodio (Na), lantano (La), selenio (Se), silicio (Si), titanio (Ti) y vanadio (V) (Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2018).

Estos elementos pueden mejorar el crecimiento, desarrollo y calidad de los cultivos mediante la estimulación de diferentes mecanismos moleculares, bioquímicos y fisiológicos cuando se encuentran en entornos difíciles como factores de estrés bióticos o abióticos (Pilon-Smits *et al.*, 2009; Trejo-Téllez *et al.*, 2016; Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2018).

El Ce, elemento benéfico, tiene como símbolo químico Ce y número atómico 58 (Kilbourn, 2000). Es un metal flexible, maleable y dúctil (Habashi, 2013; Chauvel, 2018), pertenece al grupo de los elementos de tierras raras (REE). Se ha empleado en la agricultura mostrando diversos efectos positivos, tales como, el aumento en la concentración de clorofila (Yang *et al.*, 2005), la mitigación de deficiencias de algunos nutrimentales (Huang *et al.*, 2008), y el incrementa el peso de la biomasa seca y fresca (Fashui, 2002). Asimismo, el Ce incrementa la concentración de azúcares solubles en hojas (Xie *et al.*, 2015) y la duración de la vida en florero (Wang *et al.*, 2017; Hou *et al.*, 2018).

Esta investigación tiene como objetivo estudiar los efectos del Ce aplicados vía foliar durante el ciclo productivo en la calidad poscosecha y vida de florero de tulipán cv. Jan van Nes.

## **4.3 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.3.2 Tratamientos y diseño experimental**

En poscosecha, se evaluó el efecto de la adición de Ce vía foliar en las dosis antes referidas, incluido el testigo. Para lo anterior, los tallos florales cosechados 49 días después de siembra fueron trasladados al laboratorio y etiquetados por tratamiento. La unidad experimental fue un recipiente de vidrio con 250 mL de agua destilada y un tallo floral, mismas que se distribuyeron en un diseño experimental completamente al azar (DECA), con nueve repeticiones por cada tratamiento.

### **4.3.3 Variables evaluadas**

#### **4.3.3.1 Longitud y diámetro de tallo**

Estas dos variables se evaluaron desde el momento del corte (día 0), posteriormente a los 2, 4, 6 y 8 días en florero. La longitud de tallo se midió empleando un flexómetro desde la base del botón floral hasta la terminación del tallo. El diámetro de tallo se midió en tres estratos: basal, media y superior con un vernier digital (Trupper).

#### **4.3.3.2 Longitud y diámetro del capullo**

Al momento del corte y a los 2, 4, 6 y 8 días en florero se determinaron estas dos variables empleando un vernier digital.

#### **4.3.3.3 Consumo de agua por periodo y peso fresco del tallo floral**

A partir del volumen inicial del agua (250 mL) se determinó el consumo del agua por periodo, es decir a los 2, 4, 6 y 8 días en florero. El peso del tallo floral se determinó desde el momento de la cosecha y después a los 2, 4, 6 y 8 días en florero.

#### **4.3.3.4 Vida de florero**

La vida útil de la flor se definió contabilizando los días transcurridos desde la cosecha de los tallos florales hasta que la flor presentó síntomas claros de envejecimiento, es decir, marchitez superior a 50% en los tépalos y pérdida de color de los tépalos.

#### **4.3.3.5 Peso biomasa fresca y seca por órgano**

Al finalizar la vida de florero, las plantas se fraccionaron por órganos (tallo, hoja y flor). El peso fresco de cada órgano se determinó empleando una balanza analítica (Adventurer™ Pro, Ohaus, USA). Las muestras de cada órgano fueron guardadas en bolsas de papel y posteriormente colocadas en una estufa de secado con circulación forzada de aire (Riossa HCF-125, México) a 72 °C por 72 h) para la determinación del peso de la materia seca.

#### **4.3.3.6 Contenido nutrimental en flor, hoja y tallo**

En cada órgano se realizó análisis de concentración de nutrimentos. Para nitrógeno total, se utilizó el método de Semimicro-Kjeldahl (Bremner, 1965), para lo cual las muestras fueron digeridas con una solución de  $C_7H_6O_3$  al 3.3% en  $H_2SO_4$  concentrado. Las concentraciones de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B fueron determinadas en el extracto resultante de la digestión ácida con  $HNO_3:HClO_4$  (2:1, v: v) (Alcántar y Sandoval, 1999), usando un espectrofotómetro de emisión atómica de inducción atómica por plasma acoplado (ICP-OES 725-ES; Agilent; Santa Clara, CA, USA). Con los resultados de concentración de cada nutrimento por órganos y el peso de materia seca de éstos, se estimó el contenido nutrimental.

#### **4.3.3.7 Contenido de azúcares totales**

Se estimó la concentración de azúcares en tejido fresco de hojas y flores al final de la vida de florero. Se pesaron 1,000 y 250 mg de hoja y flor respectivamente, posteriormente las muestras se molieron usando nitrógeno líquido. Se empleó el método descrito por Bailey (1958) con antrona, ácido sulfúrico y alcohol al 80%. Para cuantificar los azúcares solubles totales, se realizó una curva estándar usando glucosa (Sigma-Aldrich; Saint Louis, MO, EE. UU.). Se midió en una absorbancia de 600 nm en un espectrofotómetro (Genesys™ 10S ThermoFisher Scientific; Waltham, MA, EE. UU.). Considerando las concentraciones de azúcares y el peso de biomasa fresca de hojas y flores por tallo floral, se estimó el contenido de azúcares.

#### **4.3.3.8 Contenido de clorofila**

La determinación de las concentraciones de clorofilas *a*, *b* y total se realizó en las hojas al final de la vida de flor con el método descrito por Sumanta *et al.* (2014). La extracción se realizó con acetona al 80%. La absorbancia se determinó a una longitud de onda de 470, 646.8 y 663.2 nm en un espectrofotómetro (Genesys™ 10S ThermoFisher Scientific; Waltham, MA, EE. UU.) y las concentraciones se estimaron usando las siguientes fórmulas: Clorofila *a* ( $Ch\ a; \mu g\ mL^{-1}$ ) =  $12.25(A_{663.2})$

$-2.79 (A_{646.8})$ ; Clorofila *b* (Ch *b*;  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) =  $21.50(A_{646.8}) - 5.10 (A_{663.2})$ ; Clorofila total (Ch tot ;  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) = Ch *a* + Ch *b* = Carotenoides totales ( $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) =  $1000 (A_{470} - 1.82 \text{ Ch } a - 85.02 \text{ Ch } b) / 198$ . Con los valores de concentración de clorofilas y el peso de biomasa fresca de hojas por tallo floral, se estimó el contenido de clorofilas.

#### **4.3.3.9 Contenido de prolina libre total**

Empleando el método descrito por [Bates et al. \(1973\)](#), la prolina se determinó en hojas y flores al final de la vida florero. Se utilizaron 500 mg de hoja y 200 mg de flor, los cuales fueron molidos empleando nitrógeno líquido. Luego se realizó una primera extracción macerando las muestras con 5 mL de ácido sulfosalicílico al 3%, y filtrando la muestra con papel de filtro Whatman No. 4. Posteriormente, se mezclaron 2 mL de solución de ninhidrina al 2.5% (p:v) en ácido acético al 60% y ácido fosfórico 6 M (40%), más 2 mL de ácido acético glacial concentrado y 2 mL del extracto de cada muestra. La mezcla se incubó en baño María a 95 °C durante 40 min. La reacción se detuvo colocando las muestras en hielo. Después de la reacción, se añadieron 4 mL de tolueno a cada muestra, se mezclaron brevemente en un vórtex y se incubaron a temperatura ambiente durante 15 min. Para la cuantificación de la prolina, se construyó una curva estándar usando L-prolina ( $400 \text{ nM mL}^{-1}$ ) y la absorbancia correspondiente se midió a 520 nm en un espectrofotómetro (Genesys™ 10S ThermoFisher Scientific; Waltham, MA, EE. UU.). Con los valores de concentración obtenidos y el peso de biomasa fresca de hojas y flores por tallo floral, se estimó el contenido de prolina en cada órgano.

#### **4.3.4 Análisis estadístico**

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y las medias se compararon con la prueba de Tukey con  $\alpha=0.05$ . Se empleó el sistema de análisis SAS versión 9.4 ([SAS Institute, 2013](#)).

#### **4.3.5 Material vegetal y condiciones del experimento**

El presente experimento se realizó en las instalaciones del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México. Para la obtención de los tallos florales de tulipán (*Tulipa gesneriana* L.), fue necesario la siembra de bulbos comerciales cultivar Jan van Nes, adquiridas con el proveedor EUROBULBOS, S. de R. L. de C. V, mismas que fueron crecidas bajo condiciones de invernadero con cubierta y malla sombra (monofilamente negro calibre 70%) durante el periodo otoño-invierno, con

una temperatura promedio de 14 °C, 52% de HR y una intensidad lumínica de 125 lumens m<sup>-2</sup>.

Antes de realizar la siembra, los bulbos fueron desinfectados por el método de inmersión durante 15 min en una solución compuesta por 2 g Ridomil Gold® Bravo SC [metalaxil-M (3.30%) + clorotalonil (33.00%)] L<sup>-1</sup> y 1 g Captan® [N-triclorometiltio-4-ciclohexeno-1,2-dicarboximida (50%)] L<sup>-1</sup>.

Los bulbos se colocaron en macetas de 7 pulgadas, empleando como sustrato una mezcla de tezontle roja, perlita (Agrolita MR) y turba (Promix® FLX) en una proporción 70:20:10, v: v: v.

La fertilización empleada en el ciclo productivo fue la solución nutritiva Steiner (Steiner, 1984) al 50%, misma que contenía en g L<sup>-1</sup>: 0.5313 de Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 4H<sub>2</sub>O, 0.2464 de MgSO<sub>4</sub> 7H<sub>2</sub>O, 0.0680 de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0.1516 de KNO<sub>3</sub> y 0.1306 de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La solución nutritiva se complementó con la mezcla comercial de micronutrientes TradeCorp® AZ adicionando 0.0665 g L<sup>-1</sup> de solución nutritiva, que aporta en mg L<sup>-1</sup>: 4.99 de Fe, 2.33 de Mn, 0.47 de Zn, 0.18 de Cu, 0.43 de B y 0.17 de Mo. El pH de la solución nutritiva fue ajustado a 5.3, utilizando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado.

Se empleó un sistema de riego por goteo localizado, los cuales fueron programados con un temporizador digital (Steren, China), con cuatro tiempos de riego al día con una duración de un minuto cada uno, aplicando un volumen promedio de 80 mL por cada riego.

Se realizaron dos aplicaciones foliares de Ce a diferentes concentraciones durante el ciclo productivo. Las aplicaciones foliares se efectuaron a los 30 y 45 días después de la siembra de bulbos.

Las concentraciones de Ce evaluadas fueron 5, 15 y 25 µM a partir de CeCl<sub>3</sub> 7H<sub>2</sub>O, además de un testigo sin adición de Ce (0 µM Ce). Las soluciones fueron preparadas el mismo día de la aplicación, cada aspersion se realizó a primera hora de la mañana, rociando completamente las plantas hasta punto de goteo. El pH promedio de las soluciones fueron 4.08, 4.67, 4.16 y 3.99 para el tratamiento testigo, 5, 15 y 25 µM Ce respectivamente. En todos los tratamientos con Ce, incluyendo el testigo se empleó un adherente-dispersante comercial Tween™ 20 en una concentración de 1 g L<sup>-1</sup>.

Cuarenta y nueve días después de la siembra de bulbos, los tallos florales alcanzaron la etapa de brote comercial (botones florales con tépalos cerrados), y entonces fueron cosechados para la evaluación poscosecha.

## 4.4 RESULTADOS

### 4.4.1 Longitud y diámetro de tallo

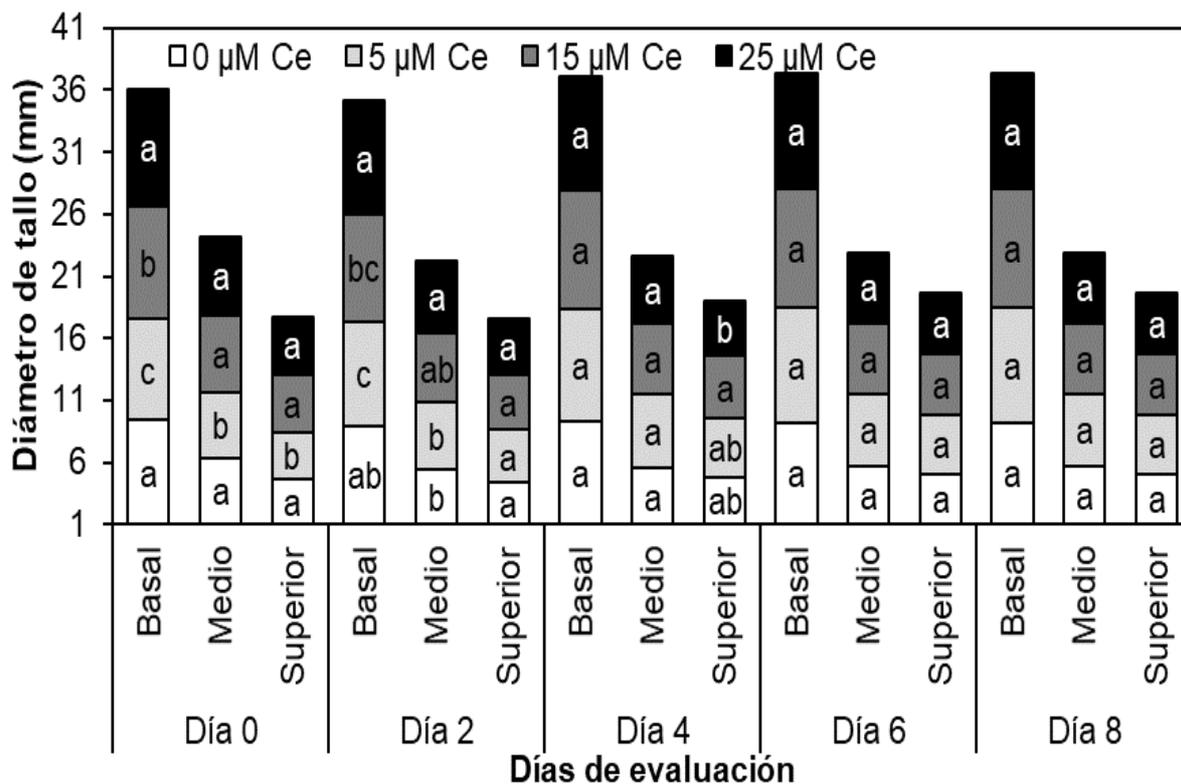
En el **Cuadro 5.1** se puede observar que, a lo largo de la vida de florero, los tallos florales de los diferentes tratamientos muestran una tasa de elongación ascendente. Al momento de la cosecha (Día 0), la menor longitud de los tallos florales se registró en las plantas asperjadas con 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, disminuyendo el valor de esta variable en 17.97 y 7.79% respectivamente, en comparación con las plantas del testigo. Por otro lado, plantas tratadas con 15  $\mu\text{M}$  Ce, tuvieron un comportamiento similar al testigo. Esta misma tendencia se mantuvo hasta el día 4 de la evaluación, excepto en las plantas asperjadas con 25  $\mu\text{M}$  Ce, en donde los tallos florales se elongaron de manera considerable, alcanzado la longitud de las plantas testigo, pero esta elongación solo fue estadísticamente diferente con el testigo en el día 4. En tanto que, en los días de evaluación 6 y 8 no existieron diferencias entre tratamientos.

**Cuadro 5.1.** Longitud de tallos florales de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministradas vía foliar en el ciclo productivo.

Ce ( $\mu\text{m}$ )	Longitud de tallo (cm)				
	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8
0	26.70 $\pm$ 1.36 a <sup>z</sup>	38.42 $\pm$ 2.22 a	40.66 $\pm$ 2.83 ab	41.88 $\pm$ 2.75 a	42.58 $\pm$ 1.57 a
5	21.90 $\pm$ 2.77 b	34.84 $\pm$ 1.45 b	38.60 $\pm$ 1.20 b	40.18 $\pm$ 1.22 a	41.12 $\pm$ 0.68 a
15	26.88 $\pm$ 1.20 a	37.38 $\pm$ 1.29 a	40.36 $\pm$ 1.64 ab	41.66 $\pm$ 1.84 a	41.86 $\pm$ 1.73 a
25	24.62 $\pm$ 3.04 ab	37.72 $\pm$ 2.16 a	41.38 $\pm$ 2.53 a	42.80 $\pm$ 2.92 a	42.98 $\pm$ 2.98 a

<sup>z</sup>Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

Las aplicaciones foliares de Ce tuvieron un efecto significativo en el diámetro de tallo al momento del corte y durante la vida de florero, excepto en las dos últimas evaluaciones (días 6 y 8) (**Figura 5.1**).



**Figura 5.1.** Diámetro de tallos de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada estrato del tallo (basal, medio, superior) y día de evaluación, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

Al momento de corte (Día 0), plantas asperjadas con 5  $\mu\text{M}$  Ce registraron el menor diámetro de tallo basal (8.14 mm), medio (5.32 mm) y superior (3.66 mm), estos valores fueron estadísticamente distintos a los registrados en las plantas testigo (basal, 9.40 mm; medio, 6.33 mm; y superior, 4.69 mm). La dosis 15  $\mu\text{M}$  Ce redujo solo el valor del diámetro basal (9.12 mm), en tanto que, la concentración más alta de Ce no mostró diferencias estadísticas con el testigo (**Figura 5.1**).

El efecto negativo que causó la baja concentración de Ce (5  $\mu\text{M}$ ) se mantuvo hasta el día 2, pero solo en los diámetros basal y medio del tallo. Por el contrario, 25  $\mu\text{M}$  Ce mejoró diámetro de tallo basal y del estrato en el segundo día en florero (**Figura 5.1**).

En el día 4 en florero, la dosis 25  $\mu\text{M}$  Ce redujo de manera significativa el diámetro superior en comparación con el registrado en plantas tratadas con la dosis 15  $\mu\text{M}$  Ce; pero no tuvo diferencia estadística con el testigo (**Figura 5.1**).

#### 4.4.2 Longitud y diámetro del capullo

La longitud y el diámetro del botón floral tuvieron una tendencia ascendente entre los días 0 y 4 o 6. En el último día de evaluación (día 8), no se registran datos debido a la abscisión los tépalos (**Cuadros 5.2 y 5.3**).

**Cuadro 5.2.** Longitud del botón floral de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo.

Ce ( $\mu\text{m}$ )	Longitud de capullo (mm)				
	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8
0	52.64 $\pm$ 1.55 ab <sup>z</sup>	59.43 $\pm$ 1.37 a	69.44 $\pm$ 0.89 a	66.72 $\pm$ 1.14 a	---
5	50.16 $\pm$ 2.33 c	56.38 $\pm$ 2.17 b	62.36 $\pm$ 1.19 b	65.97 $\pm$ 1.82 a	---
15	54.02 $\pm$ 1.55 a	59.85 $\pm$ 1.27 a	67.94 $\pm$ 1.71 a	65.40 $\pm$ 3.31 a	---
25	50.96 $\pm$ 2.07 bc	56.76 $\pm$ 2.86 b	64.06 $\pm$ 3.21 b	66.70 $\pm$ 2.35 a	---

<sup>z</sup>Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

**Cuadro 5.3.** Diámetro del botón floral de tulipán durante la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo.

Ce ( $\mu\text{m}$ )	Diámetro de capullo (mm)				
	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8
0	16.89 $\pm$ 0.45 a <sup>z</sup>	57.27 $\pm$ 2.00 a	72.19 $\pm$ 2.97 a	56.02 $\pm$ 9.04 a	---
5	16.29 $\pm$ 0.69 a	53.97 $\pm$ 6.47 a	65.10 $\pm$ 5.25 b	62.85 $\pm$ 4.23 a	---
15	16.73 $\pm$ 0.35 a	55.34 $\pm$ 1.52 a	68.17 $\pm$ 4.17 ab	62.63 $\pm$ 2.41 a	---
25	16.86 $\pm$ 0.42 a	46.58 $\pm$ 3.44 b	66.26 $\pm$ 2.57 b	57.63 $\pm$ 4.80 a	---

<sup>z</sup>Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

Al momento de corte, en las plantas asperjadas con 15  $\mu\text{M}$  Ce, la longitud de botón fue ligeramente mayor (54.02 mm) en comparación con las plantas testigo (52.64 mm), lo que representa un aumento del 2.62%; sin embargo, esta diferencia no es significativa. Por otro lado, plantas tratadas con 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, obtuvieron una disminución significativa en la longitud del botón floral en 4.71 y 3.19%, respectivamente, en comparación con el testigo; estos efectos negativos se

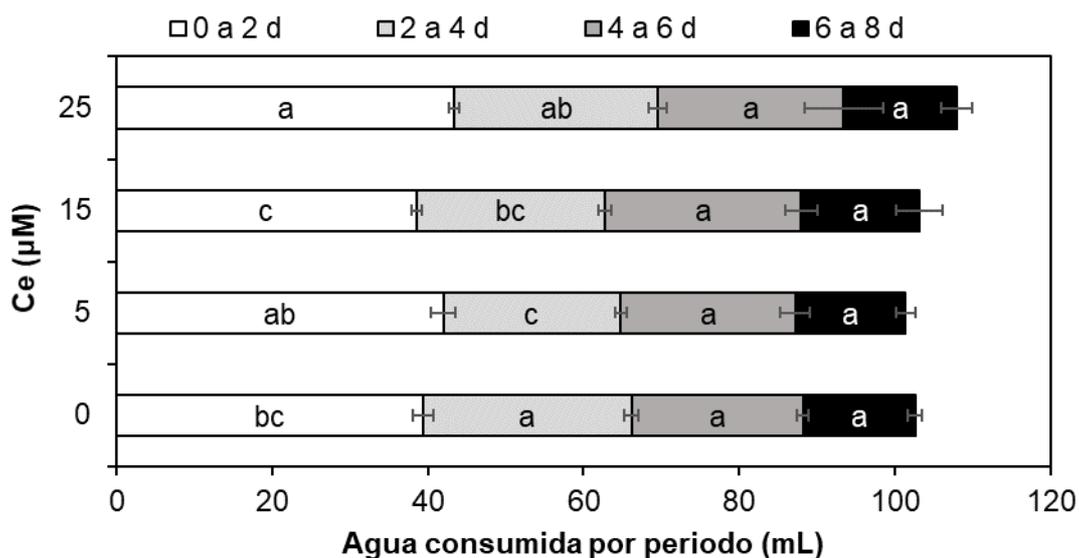
mantuvieron hasta el día 4. En el día 6 en florero, no existieron diferencias entre los tratamientos (**Cuadro 5.2**).

Las aplicaciones foliares de Ce durante el ciclo productivo no tuvieron un efecto significativo en el diámetro del botón floral al momento de corte, pero sí en las evaluaciones realizadas los días 2 y 4 en florero. En el día 2 en florero, plantas tratadas con altas concentraciones de Ce (25  $\mu\text{M}$ ) exhibieron un menor diámetro de botón (46.58 mm), lo que representó una reducción del 18.66% respecto a las plantas testigo (57.27 mm); en tanto que, los demás tratamientos con Ce no fueron diferentes desde el punto de vista estadístico al testigo (**Cuadro 5.3**).

En el día 4, las plantas testigo exhibieron el mayor diámetro del botón floral, observándose que plantas testigo no fueron estadísticamente a plantas tratadas con 15  $\mu\text{M}$  Ce. El menor diámetro de capullo se presentó con las dosis 5  $\mu\text{M}$  Ce, presentando una disminución significativa de 9.82 % respecto al testigo. En el día 6, todos los tratamientos registraron una respuesta similar (**Cuadro 5.3**).

#### **4.4.3 Consumo de agua por periodo y peso fresco del tallo floral**

Se evaluó por periodos, el consumo de agua de tallos florales de plantas expuestas al suministro de Ce vía foliar. En la **Figura 5.2** se observa que, el mayor consumo de agua ocurrió en los primeros 2 días en florero, registrándose una disminución a través del tiempo. En el intervalo de 0 a 2 días en florero, tallos florales obtenidos de los tratamientos 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce registraron el mayor consumo de agua con un volumen promedio de 42 y 43.4 mL, lo que representan incrementos de 6.59 y 9.13% respectivamente en comparación al testigo (39.4 mL); siendo superior al testigo desde el punto de vista estadístico solo la dosis 25  $\mu\text{M}$  Ce. En contraste, la concentración 15  $\mu\text{M}$  Ce registró el menor consumo de agua (38.6 mL), lo que significó una reducción de 2.03% respecto al valor de las plantas testigo; dicha reducción no es significativa.

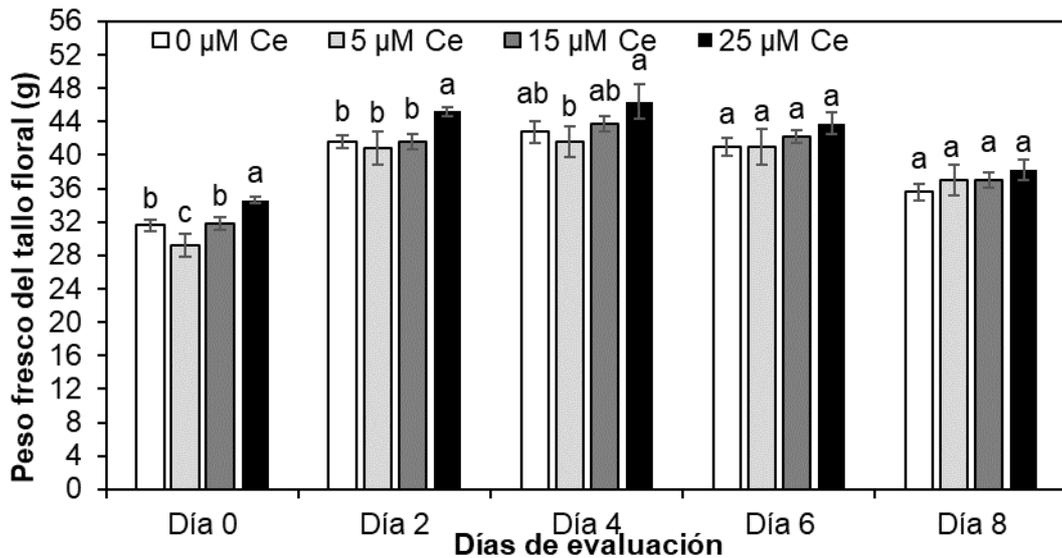


**Figura 5.2.** Consumo de agua de tallos florales de tulipán en florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada evaluación, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

En el intervalo de 2 a 4 días en florero, tallos florales obtenidos de las plantas testigo absorbieron un mayor volumen de agua (26.8 mL), por el contrario, se registrando disminuciones significativas de 14.92 y 9.70% en con los tratamientos 5 y 15  $\mu\text{M}$  Ce respectivamente. Mientras que, en los intervalos de 4 a 8 días en florero no se observaron diferencias significativas en el consumo de agua entre tratamientos (**Figura 5.2**).

Cabe mencionar que, el total de volumen de agua consumido durante la vida de florero fue mayor en los tallos florales obtenidos del tratamiento 25  $\mu\text{M}$  Ce, con un promedio de 108 mL, mientras que, los tallos florales de las plantas testigo solo consumieron en promedio 102.6 mL (**Figura 5.2**).

Respecto al peso fresco del tallo floral, al momento de corte, el mayor valor de esta variable se registró en las plantas rociadas con 25  $\mu\text{M}$  Ce, superando al testigo en un 9.49%; por el contrario, la concentración de 5  $\mu\text{M}$  Ce redujo el peso fresco del tallo en 7.59% respecto al testigo (**Figura 5.3**).



**Figura 5.3.** Peso fresco de tallos florales de tulipán en la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada evaluación, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

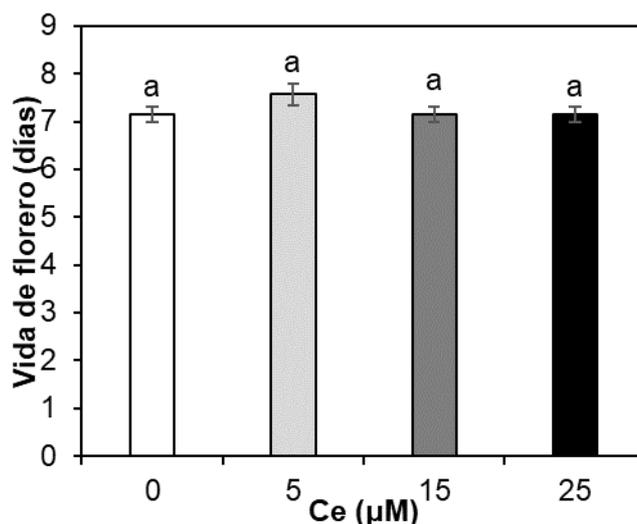
A partir del día 2, el peso del tallo aumentó en todos los tratamientos, alcanzando su máximo valor en el día 4 en florero, observándose una disminución a media que los tallos florales se acercaban a la senescencia (Días 6 y 8) (**Figura 5.3**).

Al segundo y cuarto días en florero, en los tallos florales provenientes de plantas tratadas con una alta dosis de Ce (25  $\mu\text{M}$ ) se siguió presentado el mayor peso fresco, superando al testigo en 8.65 y 8.41% respectivamente; pero, solo en el día 2 dicha diferencia fue significativa. El día 4 en florero, se tuvo efecto negativo de 5  $\mu\text{M}$  Ce, registrando disminuciones del 2.80% respecto al valor del testigo; sin embargo, dicha reducción no es significativa (**Figura 5.3**).

En los días 6 y 8 en florero, los tratamientos no presentan diferencias significativas (**Figura 5.3**).

#### 4.4.4 Vida de florero

Las diferentes concentraciones de Ce aplicadas vía foliar durante el ciclo productivo no tuvieron un efecto significativo en la vida de florero (**Figura 5.4**).



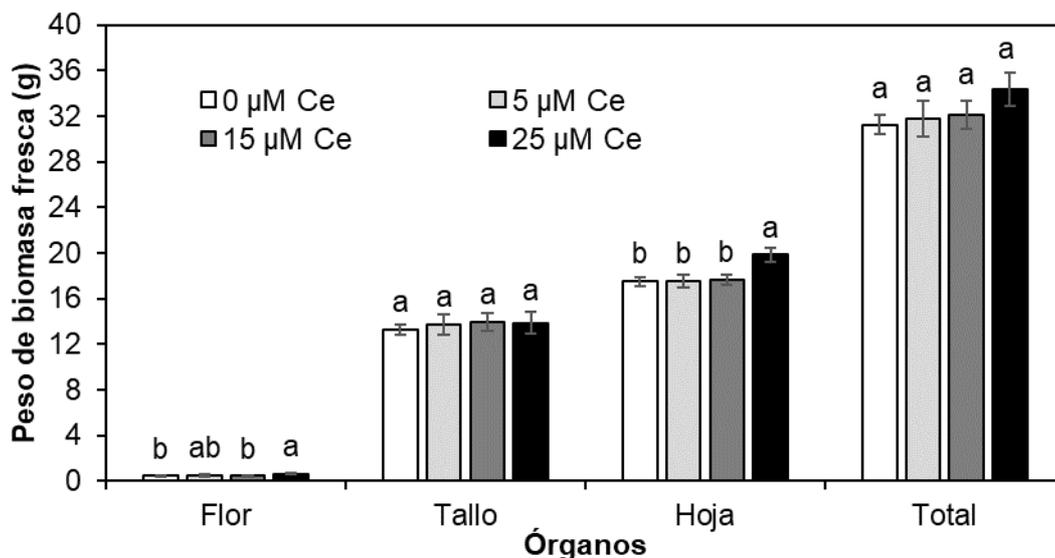
**Figura 5.4.** Vida de florero de tallos florales de tulipán, proveniente de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada barra, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

#### 4.4.5 Peso biomasa fresca y seca por órgano

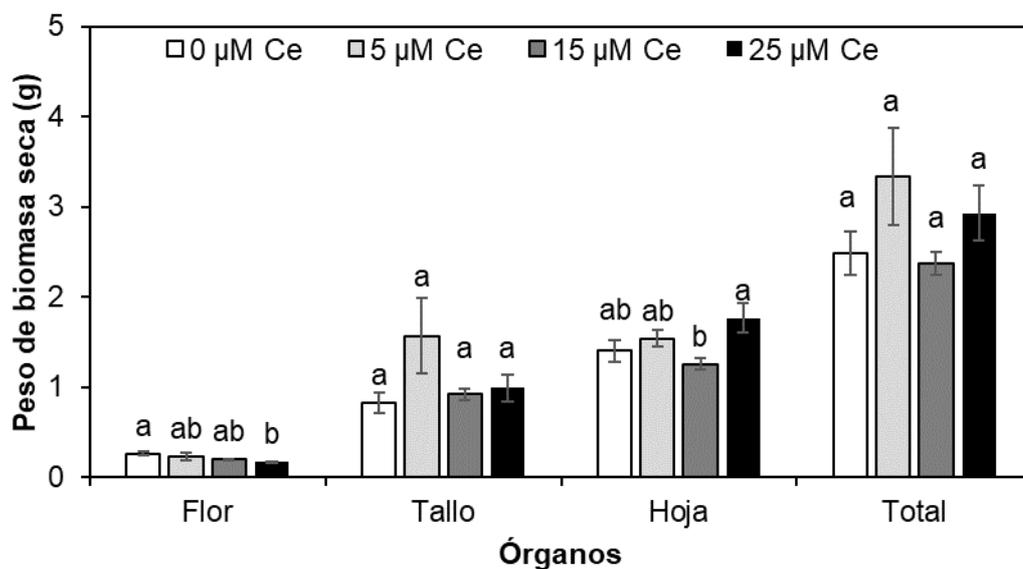
Las aplicaciones foliares de Ce solo tuvieron efecto significativo en el peso de las biomásas fresca y seca de flor y hoja (**Figuras 5.5 y 5.6**).

En flor, el mayor peso fresco se registró con el tratamiento 25  $\mu\text{M}$  Ce, superando al testigo en 36.95%. De la misma manera, solo la concentración de 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentó la biomasa fresca de hoja en 13.17% respecto al testigo (**Figura 5.5**).

En lo que respecta al peso de la biomasa seca de la flor, el testigo presentó los mejores valores, en contraste, se obtuvo una reducción del peso en 34.61% con la concentración de 25  $\mu\text{M}$  Ce. En la biomasa seca de hoja, solo se observaron diferencias estadísticas entre las dosis 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce, registrándose la media más alta en este último tratamiento (**Figura 5.6**).



**Figura 5.5.** Peso de biomasa fresca de los diferentes órganos de tulipán y total al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .



**Figura 5.6.** Biomásas secas de diferentes órganos de tulipán y total al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada órgano, indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=9$ .

#### 4.4.6 Contenido nutrimental en flor, hoja y tallo

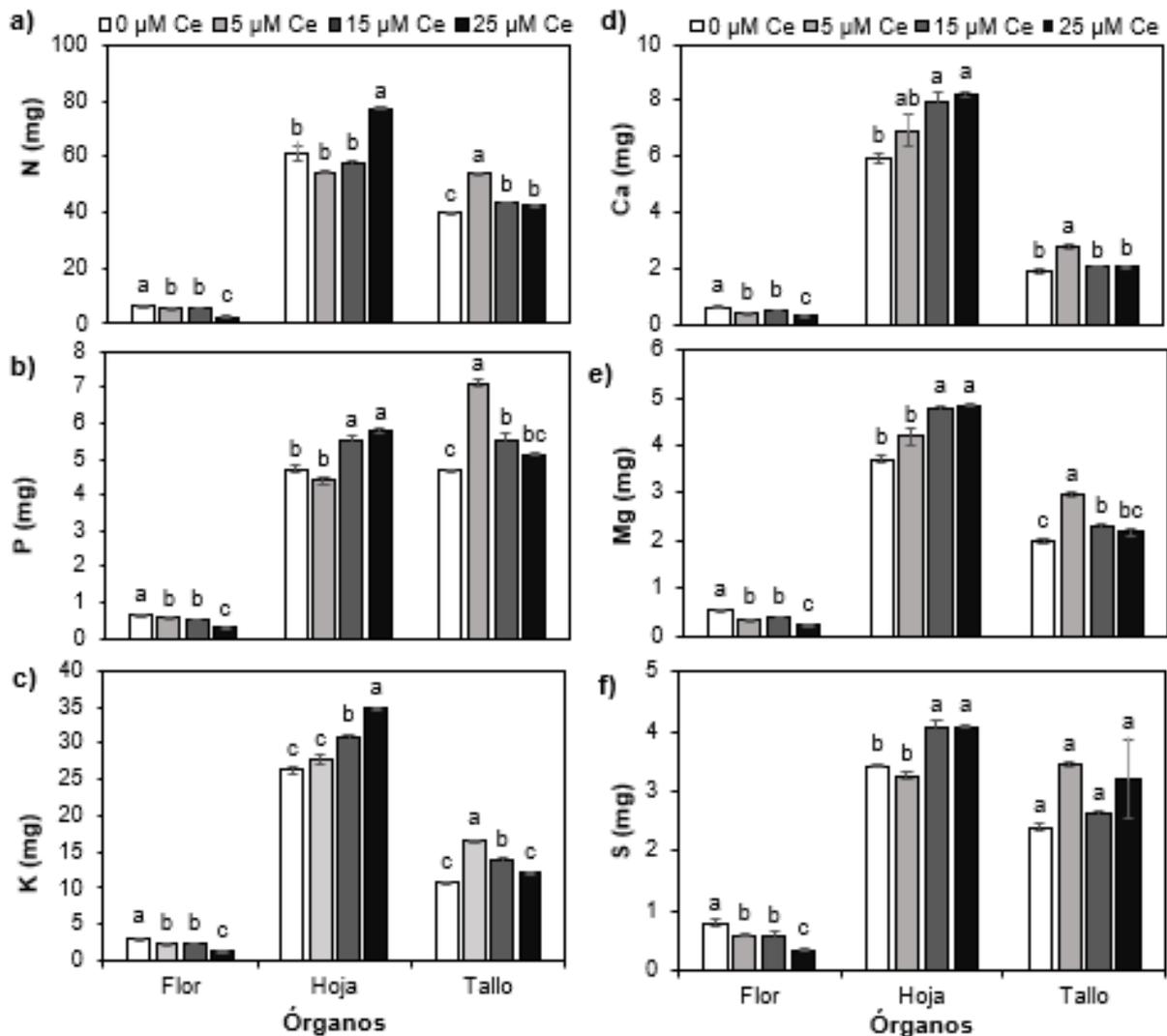
Los contenidos nutrimentales en los diferentes órganos de tulipán evaluados al final de la vida florero se vieron afectados por las aplicaciones foliares durante el ciclo productivo (**Figuras 5.7 y 5.8**).

La mayoría de los macronutrientes (N, K, Ca, Mg, S) se acumuló principalmente en las hojas, este resultado fue más evidente con cuando se aplicó una alta concentración de Ce (**Figura 5.7**).

En flor, las diferentes concentraciones de Ce redujeron el contenido de todos los macronutrientes; estas reducciones fueron más marcadas con el tratamiento de 25  $\mu\text{M}$  Ce; respecto al testigo, con contenido de N, P, K, Ca, Mg y S inferiores en 61.58, 53.03, 58.09, 54.83, 57.40 y 55.12%, respectivamente (**Figuras 5.7a a 5.7f**).

En hoja, con la concentración 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentó significativamente el contenido de N en 18.09% (**Figura 5.7a**); mientras tanto, 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce incrementaron significativamente el contenido de P en 17.37y 22.66%; el de K en 17.46 y 32.80% el de Ca en 34.51 y 38.38%; el de Mg, en 29.18 y 30.54%; y finalmente el de S en 19.32 y 19.35% (**Figuras 5.7b a 5.7f**), en todos los casos en comparación con al testigo.

En tallo, con la concentración de 5  $\mu\text{M}$  Ce se obtuvieron aumentos significativos del 36.67 y 47.61% en los contenidos de N y Ca, respectivamente (**Figuras 5.7a y 5.7d**); mientras que, con los tratamientos 5 y 15  $\mu\text{M}$  Ce se obtuvieron incrementos significativos en el contenido de P en 52.78 y 18.45%; en el de K en 54.73 y 26.46%; y en Mg en 49.49 y 15.65% (**Figuras 5.7b, 5.7c y 5.7e**), en todos los casos respecto al testigo. Los contenidos de S en tallos no fueron distintos entre tratameintos (**Figura 5.7f**).

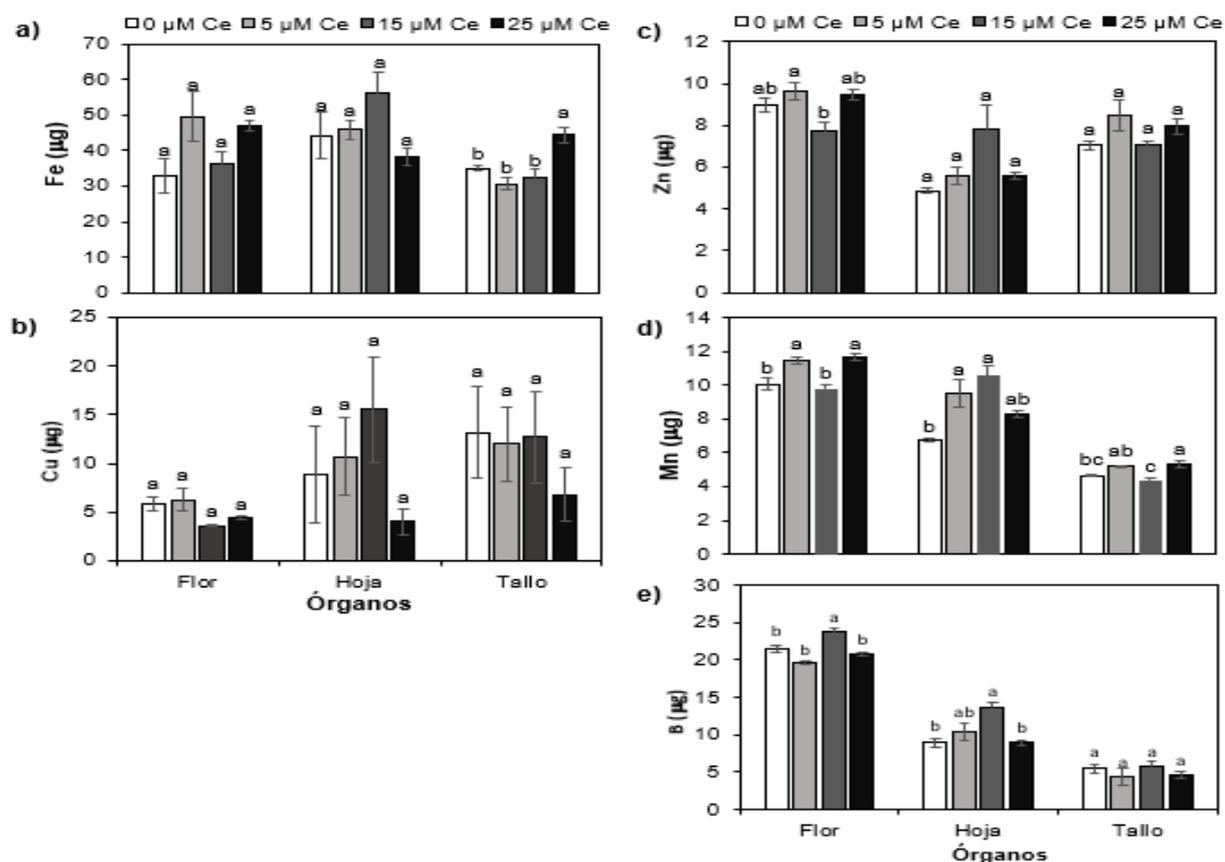


**Figura 5.7.** Contenido de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) y S (f) en diferentes órganos de tallos florales tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias ± DE con diferentes letras en cada subfigura y órgano, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=5$ .

Respecto al contenido de micronutrientes en flor, las diferentes concentraciones de Ce no tuvieron un efecto significativo en el contenido de Fe y Cu, pero si en la de Zn, Mn y B. El contenido de Zn fue estadísticamente superior en el tratamiento 5 µM Ce en comparación con el tratamiento 15 µM Ce. El contenido de Mn fue superior al testigo en 13.69 y 16.1 % con las dosis 5 y 25 µM de Ce; mientras que, la dosis 15 µM Ce causó un aumento de 10.36% en el contenido de B respecto al testigo (Figuras 5.8a a 5.8e).

En hoja, los contenidos de Fe, Cu, Zn no fueron afectados por los tratamientos con Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo (**Figuras 5.8a a 5.8c**). Por el contrario, se obtuvieron aumentos en el contenido de Mn en 40.11 y 55.89% y de B en 15.40 y 51.11%, con las concentraciones de 5 y 15  $\mu\text{M}$  Ce, respecto al testigo (**Figuras 5.8c y 5.8d**).

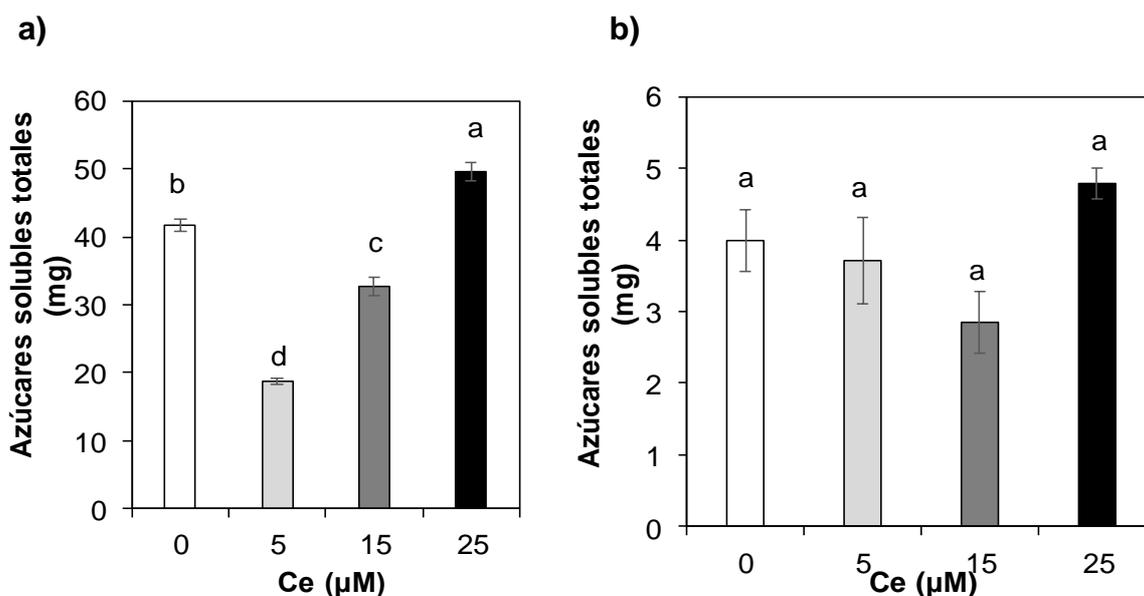
En tallo, las diferentes concentraciones de Ce no afectaron de manera significativa el contenido de Cu, Zn y B (**Figuras 5.8b, 5.8c y 5.8e**); mientras que, una alta concentración de Ce (25  $\mu\text{M}$ ) aumentó de manera significativa el contenido de Fe y Mn en 26.77 y 15.08%, respectivamente, en comparación con el testigo (**Figuras 5.8a y 5.8d**).



**Figura 5.8.** Contenido de Fe (a), Cu (b), Zn (c), Mn (d) y B (e) en diferentes órganos de tallos florales de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con diferentes letras en cada subfigura y órgano, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=5$ .

#### 4.4.7 Contenido de azúcares totales

La concentración de azúcares, independientemente de los tratamientos, fue superior en hojs que en flor (**Figura 5.9**). Las diferentes concentraciones de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo solo tuvieron un efecto significativo en el contenido de azúcares solubles totales en hoja (**Figura 5.9a**); en tanto que, en flor, no se detectó diferencia significativa (**Figura 5.9b**).



**Figura 5.9.** Contenido de azúcares solubles totales en hoja (a) y flor (b) de tallos florales de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con diferentes letras en cada subfigura, indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

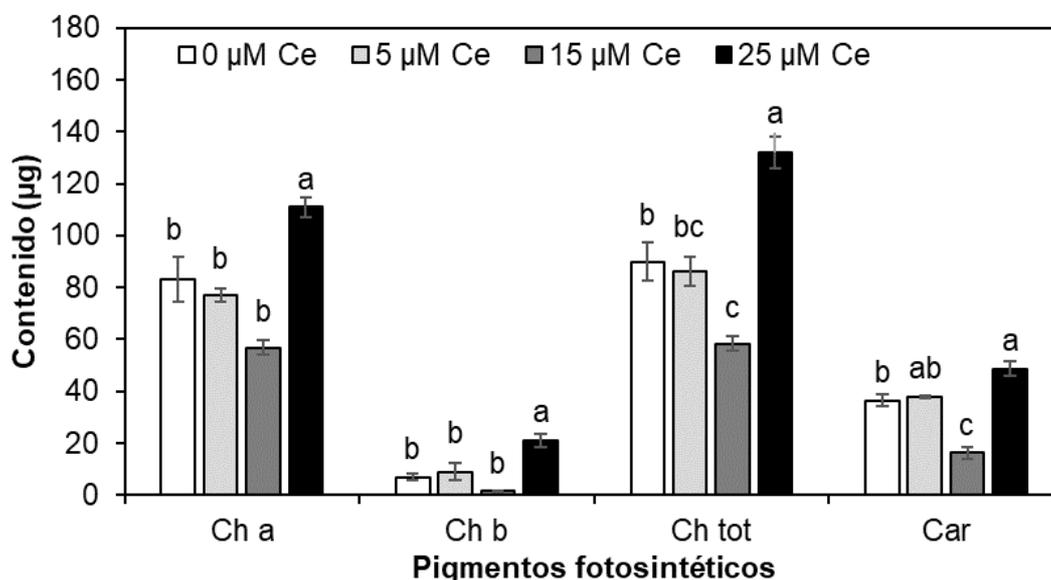
Una alta concentraciones de Ce (25  $\mu\text{M}$ ) aumentó el contenido de azucars solubles totales en hoja en 18.83%, en contraste, se obtuvo una reducción del 55.19 y 21.60% con las concentraciones de 5 y 15  $\mu\text{M}$  de Ce respectivamente, en todos los casos en comparación con el testigo (**Figura 5.9a**).

#### 4.4.8 Contenido de clorofilas

La aplicación de Ce foliar tuvo tu efecto significativo en los contenidos de pigmentos fotosintéticos de las hojas evaluadas al final de la vida de florero (**Figura 5.10**).

El contenido de clorofilas *a*, *b*, total y carotenoides fue superior al testigo en el tratamiento 25  $\mu\text{M}$  Ce en 33.58, 204.89, 46.79 y 33.68% respectivamente. Por el contrario, la dosis 15  $\mu\text{M}$  Ce causó una reducción significativa en el contenido de

clorofila total y de carotenoides en 31.11 y 55.57%, respectivamente, en comparación al valor del testigo (**Figura 5.10**).

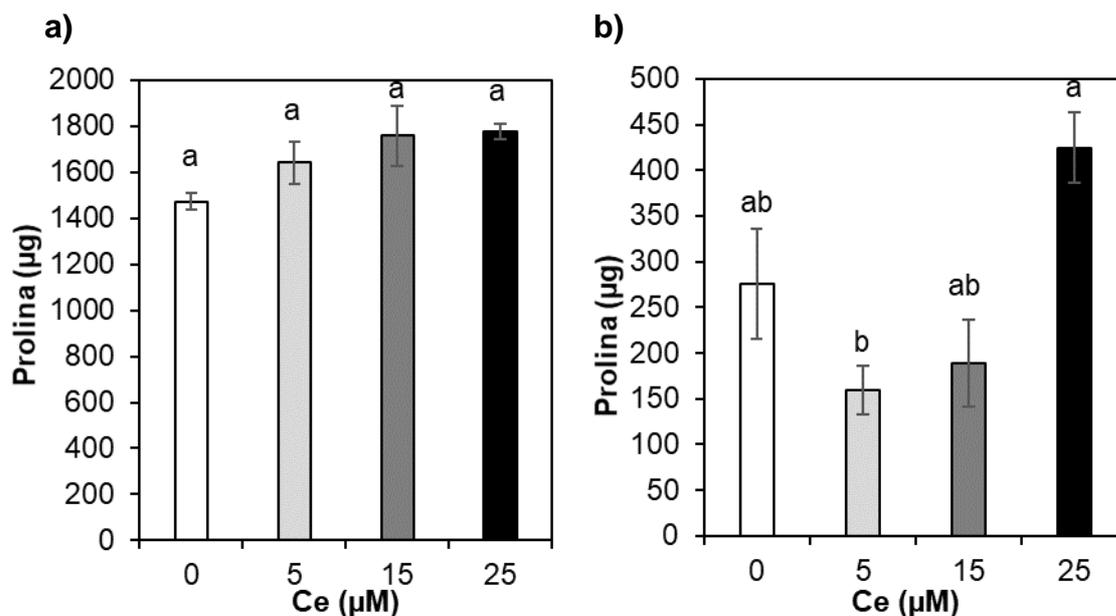


**Figura 5.10.** Contenido de clorofilas *a*, *b*, total y carotenoides en hoja de tallos de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con diferentes letras en cada pigmento indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

#### 4.4.9 Prolina libre total

En la **Figura 5.11** se puede observar que, el mayor contenido de prolina se obtuvo en las hojas, independientemente de los tratamientos.

Las diferentes concentraciones de Ce aplicados vía foliar no presentan un efecto significativo en el contenido de prolina en hojas al final de la vida de florero (**Figura 5.11a**); por el contrario, en flor, se registran aumentos significativos en 54.03% con la concentración de 25 µM Ce y disminuciones en 42.14% con 15 µM Ce, en ambos casos en comparación al testigo (**Figura 5.11b**).



**Figura 5.11.** Contenido de prolina en hojas (a) y flores (b) de tallos florales de tulipán al final de la vida de florero, provenientes de plantas tratadas con diferentes dosis de Ce suministrados vía foliar durante el ciclo productivo. Medias  $\pm$  DE con diferentes letras en cada subfigura indican diferencias significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

#### 4.5 DISCUSIÓN

La calidad comercial de las flores de corte depende de muchos factores como la longitud y grosor de tallo, diámetro y longitud de la flor, rigidez del tallo, la frescura y vida útil de la flor (Mascarini *et al.*, 2005; Shaheen *et al.*, 2015). Estos factores son altamente dependientes del proceso de producción (Shaheen *et al.*, 2015). La aplicación de REEs durante el proceso de producción puede alterar la calidad de diferentes cultivos como maíz (*Zea mays*) (Zhao *et al.*, 2015); pepino (*Cucumis sativus*) (Hong *et al.*, 2016); pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) (García-Jiménez *et al.*, 2017); y tulipán (*Tulipa gesneriana* L.) (Ramírez-Martínez *et al.*, 2009), entre otros.

Nuestros resultados evidencian que aplicar Ce de manera foliar a las plantas de tulipán durante el ciclo productivo afecta tanto de manera negativa como positiva los parámetros de calidad al momento de corte y durante la vida poscosecha. Es importante destacar que, en la mayoría de las variables evaluadas durante la vida en florero, los efectos del Ce solo fueron evidentes hasta el día 4.

Al momento de corte (día 0), la menor longitud de tallo se observó con las dosis 5 y 25 µM Ce; sin embargo, de manera interesante, este último tratamiento provocó una considerable elongación de tallo en el día 4, rebasando inclusive el valor del testigo.

(**Cuadro 5.1**). Por otro lado, los diámetros de tallo basal, medio y superior al momento de la cosecha fueron menores al testigo con el tratamiento 5  $\mu\text{M}$  Ce; asimismo, la dosis 15  $\mu\text{M}$  Ce también redujo el diámetro basal en comparación con el testigo. Entre los días 2 y 4, el diámetro de tallo tuvo un comportamiento muy dinámico, sin seguir una tendencia por la concentración de Ce (**Figura 5.1**).

La longitud y el diámetro del botón floral tuvo un crecimiento ascendente a través de tiempo durante el periodo en florero, registrando los valores máximos de las dos variables en el día 4 y una disminución conforme se acercaba a la senescencia (**Cuadros 5.2 y 5.3**). La longitud de botón floral fue mayor en las plantas asperjadas con 15  $\mu\text{M}$  Ce al momento de corte; por el contrario, las dosis 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce causaron reducciones, estas tendencias se mantuvieron hasta el día 4 en florero (**Cuadro 5.2**). Las aplicaciones foliares de Ce durante el ciclo productivo no tuvieron un efecto significativo en el diámetro del botón floral al momento de corte; sin embargo, durante la vida de florero, plantas tratadas con 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce obtuvieron los valores más bajos en esta variable (**Cuadro 5.3**).

Desafortunadamente, no existen informes previos sobre los efectos de la aplicación foliar de Ce durante el ciclo productivo en la calidad poscosecha y la vida de florero de alguna ornamental, por lo que hemos comparado nuestros hallazgos con estudios relacionados a la calidad de algunos cultivos de importancia.

En plantas de maíz cultivados en suelo modificado con nanopartículas de dióxido de cerio ( $n\text{CeO}_2$ ), adosis de 400 y 800  $\text{mg kg}^{-1}$ , los parámetros relacionados con el crecimiento, número de hoja, longitud de brote y la producción de biomasa en raíz, tallo y hoja no se vieron afectados; pero, se informa reducciones en el rendimiento ([Zhao et al., 2015](#)). De manera similar, en plantas de pepino, la aplicación foliar de  $n\text{CeO}_2$  a concentraciones de 50, 100 y 200  $\text{mg L}^{-1}$  no afectó de manera significativa el rendimiento, la longitud y el diámetro de los frutos del pepino; en tanto que, 50  $\text{mg nCeO}_2 \text{ L}^{-1}$  reducen la firmeza del frujo ([Hong et al., 2016](#)). Por otro lado, [Ma et al. \(2020\)](#), al estudiar plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris*) cultivadas en un suelo modificado con NPs de Ce y con iones  $\text{Ce}^{3+}$  ( $\text{CeCl}_3$ ) a concentraciones de 0, 50, 100 y 200  $\text{mg kg}^{-1}$  durante 12 semanas, reportan un efecto nulo en la altura de la planta, la longitud de la hoja, los pesos frescos y secos de la planta, y en el número de vainas. Adicional a esto, los autores también reportan reducciones en el

peso fresco de la vaina por la exposición de Ce en forma de iones y de NPs, aunque esta última forma de Ce causa reducciones de mayor magnitud.

Respecto al consumo de agua, la mayor absorción ocurrió dentro de los primeros 2 días en florero registrando un declive conforme las plantas se acercaban a la senescencia (**Figura 5.2**). Por otra parte, es importante destacar que Ce no aumentó el consumo de agua durante la vida en florero, excepto en los primeros 2 días en florero, donde los tratamientos 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce resultaron ser beneficiosos; en contraste, 15  $\mu\text{M}$  Ce causó una reducción en el consumo de agua (**Figura 5.2**). La disminución en el consumo de agua durante la vida de florero generalmente se asocia al bloqueo de los vasos del xilema por el aire y al desarrollo de microorganismos que causan oclusión ([Hardenburg et al., 1986](#)).

Pese a que no existe algún reporte relacionado sobre los efectos del Ce en el consumo de agua durante la vida de florero, compararemos nuestros resultados con los efectos que tienen los REEs en la capacidad de retención de agua en pétalos florales. [Shan y Zhao. \(2015\)](#) informaron que en *lilium*, la aplicación de 30, 60 y 90  $\mu\text{M}$   $\text{LaCl}_3$  en la solución florero aumenta de manera significativa el contenido relativo de agua en 11.3, 16.9, y 6.1%, respectivamente. De manera similar, [Zheng y Guo \(2019\)](#) estudiando esta misma especie, reportan que la aplicación de 50  $\mu\text{M}$   $\text{NdCl}_3$  en la solución florero, aumenta el contenido relativo de agua. Estos autores mencionan que dichos efectos positivos están relacionados por el incremento de las sustancias de ajuste osmótico como azúcares solubles, prolina y proteína soluble en los pétalos que causan los REEs. Aunque en este experimento el Ce aumentó el contenido de prolina en flor y azúcares solubles totales en hojas, no se incrementó el consumo de agua durante la vida en florero (**Figura 5.2**), al igual que presentó un efecto nulo en la duración de la flor (**Figura 5.4**).

El incremento del peso fresco del tallo durante la vida de florero (**Figura 5.3**) estuvo relacionado al consumo de agua (**Figura 5.2**), por lo que se observó un aumento en el peso en los primeros 4 días en florero seguido de una disminución, registrándose el mayor peso de tallo con el tratamiento 25  $\mu\text{M}$  Ce y el menor peso con el tratamiento 15  $\mu\text{M}$  Ce tanto al momento de corte (día 0) como a los 4 días en florero. La aplicación foliar de Ce durante el ciclo productivo no tuvo un efecto significativo en la duración de la vida de florero de tulipán (**Figura 5.4**). La corta vida de florero pudo estar relacionado a que el consumo de agua decreció durante la vida poscosecha. Resultados totalmente opuestos han sido reportados por [Wang et al.](#)

(2017), Zheng y Guo (2018) y Hou *et al.* (2018) y estos autores documentan que el Ce mejora la vida de florero en rosa, clavel y *lilium* al ser agregado en la solución de jarrón, el Ce puede actuar de manera eficiente en la eliminación de especies reactivas de oxígeno y ayudando a promover la inhibición de la peroxidación lipídica, por tanto, retrasa la senescencia temprana de las flores.

Los hallazgos aquí presentados muestran que, la duración promedio de la vida útil de la flor fue de 7 días, lo que difiere totalmente a lo reportado por Trejo-Téllez *et al.* (2013), quienes al estudiar este mismo cultivar documentan una vida de florero promedio de 11 días.

La aplicación foliar de Ce no tuvo efecto significativo en el peso de la biomasa fresca y seca total y de tallo (**Figuras 5.5 y 5.6**). La concentración más alta de Ce (25  $\mu\text{M}$ ) aumentó de manera considerable el peso de la biomasa fresca de flor y hoja (**Figura 5.5**) y la biomasa seca de la hoja; por el contrario, redujo la biomasa seca de la flor (**Figura 5.6**). El tratamiento 15  $\mu\text{M}$  Ce redujo la biomasa seca de la hoja (**Figura 5.6**). Resultados similares fueron reportados en espinaca (*Spinacia oleracea*), donde la aplicación de 10  $\mu\text{g}$  de nitrato de Ce  $\text{mL}^{-1}$  en semillas y de 5  $\mu\text{g}$   $\text{mL}^{-1}$  de esta misma solución rociadas a plantas en maceta, aumentan el peso de fresco y seco en 28.75% y 37.14% respectivamente (Hong *et al.*, 2002a). En plantas de lechuga (*Lactuca sativa*) cultivadas en arena, la adición de  $n\text{CeO}_2$  en el sustrato a una concentración de 0 a 500  $\text{mg kg}^{-1}$  no causó efecto en la producción de biomasa; mientras que, con dosis altas (1000–2000  $\text{mg kg}^{-1}$ ), redujo de manera significativo el peso fresco y seco de los brotes y las raíces (Zhang *et al.*, 2017).

Xie *et al.* (2019) informan que los mecanismos precisos de los efectos fisiológicos y bioquímicos del Ce en las planta aún se desconocen a menudo diversos autores relacionan los efectos de Ce con su similitud con el  $\text{Ca}^{2+}$  (Chao *et al.*, 2009). El radio iónico de los iones de  $\text{Ce}^{3+}$  (1.01 Å; Habashi, 2013) son similares a los de  $\text{Ca}^{2+}$  (0.99 Å; Kretsinger, 2013), pero su afinidad con los sitios de unión de  $\text{Ca}^{2+}$  es mucho mayor debido a su mayor densidad de carga (Hu *et al.*, 2004). Hu *et al.* (2004) y Chao *et al.* (2009) sugieren que  $\text{Ce}^{3+}$  podría interferir con los efectos biológicos del  $\text{Ca}^{2+}$  al inhibir o reemplazar a este elemento a nivel celular.

Como se sabe, el  $\text{Ca}^{2+}$  desempeña un papel fundamental en la integridad y estabilidad de las membranas celulares al unir los grupos fosfatos y carboxilatos de fosfolípidos y proteínas (Hawkesford *et al.*, 2012). El calcio se puede cambiar por otros cationes (como ejemplo  $\text{La}^{3+}$  y  $\text{Ce}^{3+}$ ) en estos sitios de unión, debido a las

propiedades químicas, radios iónicos y números de coordinación similares a los REE, por lo que sugieren que los REE podrían afectar el gradiente transmembranal de protones y el potencial de la membrana (Hu *et al.*, 2004; Tyler, 2004; Ma *et al.*, 2014). Por otra parte, Xie *et al.* (2019) señalan que estos efectos también serían una posible explicación del porque Ce afecta el contenido nutrimental de las plantas.

Los resultados de esta investigación muestran que, la aplicación foliar de Ce a diferentes concentraciones alteró el contenido nutrimental de las plantas de tulipán evaluadas al final de la vida de florero. En las flores, todas las concentraciones de Ce redujeron el contenido de los macronutrientes (**Figura 5.7a a 5.7f**).

En las hojas, los tratamientos 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce incrementaron el contenido todos los macronutrientes (**Figura 5.7b a 5.7f**), a excepción de N que solo aumentó con la concentración de 15  $\mu\text{M}$  Ce (**Figura 5.7a**). En tallo, la dosis de 5  $\mu\text{M}$  Ce incrementó de manera significativa los contenidos de N y Ca (**Figuras 5.7a y 5.7d**); mientras que, 5 y 15  $\mu\text{M}$  Ce aumentaron los contenidos de P, K y Mg (**Figuras 5.7b, 5.7c y 5.7e**), en tanto que, el contenido de S, no se vio afectado por la adición de Ce (**Figura 5.7f**).

Las diferentes concentraciones de Ce no tuvieron un efecto significativo en el contenido de Fe y Cu en flor (**Figuras 5.8a y 5.8b**); Fe, Cu y Zn en hoja (**Figuras 5.8a, 5.8b y 5.8c**); Cu, Zn y B en tallo (**Figuras 5.8b, 5.8c y 5.8e**).

En flor, 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce aumentaron los contenidos de Zn y Mn (**Figuras 5.8c y 5.8d**); mientras que, 15  $\mu\text{M}$  Ce reduce Zn, pero aumenta B (**Figura 5.8e**). En hoja, 5 y 25  $\mu\text{M}$  de Ce aumentaron Mn y B (**Figuras 5.8d y 5.8e**). En tallo, solo una alta concentración de Ce (25  $\mu\text{M}$ ) aumentó el contenido de Fe y Mn (**Figura 5.8a y 5.8d**), por el contrario, 15  $\mu\text{M}$  Ce redujo Mn (**Figura 5.8d**).

Estos hallazgos indican que el Ce puede beneficiar el contenido nutrimental de los diferentes órganos de tulipán, excepto en las flores, que resulta ser el órgano más importante en las ornamentales de corte. El Ce impide la traslocación de todos los macronutrientes a este órgano. Esta alteración puede estar relacionada a las reducciones de la longitud botón y nulo efecto en el diámetro de botón al momento de la cosecha, además de la corta vida de florero; tal como lo señalan Khan *et al.* (2006) la nutrición mineral afecta en gran medida el crecimiento y calidad de los cultivos.

Xie *et al.* (2015) reportan efectos benéficos del Ce en la nutrición mineral en plántulas de *Cyclocarya paliurus*, donde la aplicación foliar de nitrato de cerio a una

concentración de 0.20 mmol L<sup>-1</sup> (300 mL de solución aplicada), aumenta de manera significativa la concentración de K, P y Cu en 105.2, 75.5 y 133.3% respectivamente; mientras que, las concentraciones de Mg, Mn y Fe aumentan en 93.2, 29.4% y 133.9%, respectivamente con las dosis de 1 mmol Ce L<sup>-1</sup>. En plántulas de pepino, la aplicación foliar de nCeO<sub>2</sub> a concentraciones de 50, 100 y 200 mg L<sup>-1</sup> incrementaron de manera significativa la concentración de P, pero disminuyeron la concentración de Ca, Fe, Mn, Mg y B (Hong *et al.*, 2016). Por otra parte, Ma *et al.* (2014) reportan que, en plantas de col china (*Brassica chinensis* L.), la aplicación foliar de tetracloruro de Ce (100 mg L<sup>-1</sup>) reduce la concentración de Cu y Zn en tallo y hoja. En plantas de maíz cultivadas en un suelo modificado con 0, 400, y 800 mg nCeO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>, no se observó efecto en la concentración de elementos nutritivos en mazorcas de maíz no desarrolladas y completamente desarrolladas (Zhao *et al.*, 2015). Por otro lado, Ma *et al.* (2020), al examinar los efectos de Ce en forma de iones (CeCl<sub>3</sub>) y en forma de NPs aplicado al suelo, a dosis que variaron de 0 a 200 mg kg<sup>-1</sup>, reportan que las NPs de Ce a 50 mg kg<sup>-1</sup> aumentan de manera significativa las concentraciones de P, S, Ca, Mn, Fe, Cu y Zn en vainas de frijol, dichos incrementos fueron del orden de 58, 61, 39, 91, 51, 44, y 37%, respectivamente, en comparación con el testigo; dosis de 100 mg kg<sup>-1</sup> de NPs de Ce solo aumentaron la concentración de S; 200 mg kg<sup>-1</sup> de NPs de Ce beneficia la concentración de S y Zn. Mientras que los iones de Ce (Ce<sup>3+</sup>) a dosis de 50 mg Ce kg<sup>-1</sup> reducen el contenido de Zn en vainas en 31%, pero aumentan la concentración de Mo en 66%. Sin embargo, los iones Ce a 100 y 200 mg Ce kg<sup>-1</sup> no modifican el contenido de los ocho elementos que estudiaron estos autores.

La aplicación de Ce vía foliar durante el ciclo productivo tuvo un efecto significativo en el contenido de biomoléculas de los tallos florales de tulipán. Una alta concentración de Ce (25 µM) aumentó de manera significativa el contenido de azúcares solubles totales en hojas; mientras que, la concentración de 5 y 15 µM Ce causaron reducciones (**Figura 5.9a**); en tanto que, en flor, las diferentes concentraciones de Ce no tuvieron un efecto significativo (**Figura 5.9b**). Resultados similares fueron informados por Zheng y Guo (2019), estos autores reportan aumentos significativos en la concentración de azúcares solubles en flores de *lilium*, al emplear NdCl<sub>3</sub> (10-100 µM) en la solución florero, otro elemento de tierras raras. Por el contrario, Zhang *et al.* (2017), reportan que, en brotes de lechuga, la concentración total de azúcar soluble no fue alterado por la adición de de nCeO<sub>2</sub> a

dosis de 0 a 2000 mg kg<sup>-1</sup> en el sustrato. De manera similar, [Ma et al. \(2020\)](#), reportan que la concentración de azúcares solubles en col china no se vio afectada por la aplicación de iones de Ce<sup>3+</sup> (CeCl<sub>3</sub>) o de NPs de Ce al suelo en dosis de 0, 50, 100 y 200 mg kg<sup>-1</sup>; sin embargo, los autores señalan que la concentración de azúcares solubles fue más alta con la adición de los iones de Ce<sup>3+</sup>.

El contenido de clorofila en las hojas es uno de los factores más importantes que determinan el potencial fotosintético ([Dai et al., 2009](#)), además de que un aumento en el contenido mejora la absorción de la luz, el flujo de transporte de electrones y la fosforilación ([Hong et al., 2005](#); [Qu et al., 2013](#)). En la poscosecha de las flores de corte, retrasar la degradación de clorofila y mantener por más tiempo el verdor de las hojas son aspectos altamente deseables ([Petridou et al., 2001](#); [Mutui et al., 2006](#)). Diversos autores han documentado que los REEs tienen un efecto beneficioso en la concentración de clorofila ([Hong et al., 2002a](#); [Hong et al., 2002b](#)), además de que los REEs podrían incrementar la actividad de la reacción fotoquímica y la evolución del oxígeno al mejorar la eficiencia en la absorción de la luz y regular la distribución de energía de excitación a los diferentes fotosistemas ([Xiaoqing et al., 2009](#)).

Los hallazgos de este estudio muestran que aplicar una alta concentración Ce (25 µM) durante el ciclo productivo tiene un efecto beneficioso en el contenido de clorofila *a*, *b*, total y carotenoides en hojas al final de la vida de florero, sin embargo, una concentración de 15 µM Ce causó una reducción significativa en el contenido de clorofila total y carotenoides (**Figura 5.10**). [Hong et al. \(2002a\)](#) reportan resultados similares en plantas de espinaca, la aplicación de 10 µg de nitrato de Ce mL<sup>-1</sup> en semillas y 5 µg mL<sup>-1</sup> de esta misma solución asperjada a las plantas, incrementan el contenido de clorofila y la tasa fotosintética en 21.82 y 31.57% respectivamente, en comparación con las plantas testigo, lo que por consiguiente estimuló el crecimiento de las plantas. Sin embargo, efectos negativos del Ce en la clorofila también fueron reportados por [Xu et al. \(2017\)](#) en plantas de lenteja de agua (*Spirodela polyrhiza*) al emplear 0, 10, 20, 40 y 60 µM Ce (NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 6H<sub>2</sub>O en la solución nutritiva, donde la concentración de clorofila disminuye significativamente a medida que aumentan los niveles de Ce. [Ma et al. \(2020\)](#) documentaron que la aplicación de iones de Ce<sup>3+</sup> (CeCl<sub>3</sub>) y NPs de Ce al suelo para maceta a una dosis que varió de 0 a 200 mg kg<sup>-1</sup> no afecta la concentración de clorofila.

Respecto al contenido de prolina, los resultados evidencian que, Ce solo alteró el contenido de prolina en flor, obteniendo aumentos con una concentración de 25  $\mu\text{M}$  Ce y disminuciones con el tratamiento 15  $\mu\text{M}$  Ce (**Figura 5.11b**). Estos hallazgos coinciden con lo reportado por [Salehi \*et al.\* \(2018\)](#) en planta de frijol común, donde la concentración de prolina aumentó al realizar aplicaciones foliares de NP de  $\text{CeO}_2$  a 500  $\text{mg L}^{-1}$ ; en cambio, una dosis de 250  $\text{mg L}^{-1}$  redujo el contenido de este aminoácido. [Zheng y Guo \(2019\)](#), al emplear  $\text{NdCl}_3$  (10-100  $\mu\text{M}$ ) en la solución florero, otro elemento de tierras raras, reportan aumentos significativos en la concentración de prolina en la flor.

En otro punto, comparando los resultados del presente experimento con los del Capítulo VI en el cual se evaluó la influencia del Ce aplicado con la solución nutritiva durante el ciclo productivo en la vida de florero y calidad poscosecha, se puede observar que Ce ofrece más efectos beneficiosos en la calidad poscosecha de tulipán cuando es aplicado junto con la solución nutritiva, al mejorar los parámetros que definen la calidad como el diámetro y longitud de botón, aumentar el diámetro de tallo y el consumo de agua, además de incrementar la biomasa fresca y seca de todos los órganos evaluados; aunque la vida de florero no mejoró con las diferentes formas de aplicación de Ce.

Respecto al contenido nutrimental, las dos formas de aplicación de Ce ofrecieron efectos beneficiosos; aunque es pertinente destacar que, al aplicar Ce de manera foliar, no hubo traslocación de macronutrientes desde este órgano. Los resultados tanto en los parámetros de calidad y el contenido nutrimental posiblemente estén relacionados con los diferentes mecanismos de absorción y traslocación de Ce, por lo que se sugiere estudiar la acumulación del Ce en los diferentes órganos de tulipán.

Los contenidos de las diferentes biomoléculas evaluadas incrementaron con la aplicación de una alta concentración de Ce, tanto de manera foliar como en la solución nutritiva.

En general podemos decir que Ce afecta a calidad poscosecha de tulipán y contenido nutrimental dependiendo de la forma de aplicación.

#### **4.6 CONCLUSIÓN**

La aplicación foliar de Ce durante el ciclo productivo tiene efectos tanto positivos como negativos en los parámetros de calidad poscosecha y contenido nutrimental.

Si bien una alta concentración de Ce mejoró el contenido de las diferentes biomoléculas evaluadas, este elemento no tuvo un efecto beneficioso en la vida de florero de tulipán. Por lo que se sugiere realizar más estudios para encontrar una concentración que beneficie tanto la vida de florero como contenido nutrimental y bioquímico.

#### 4.7 LITERATURA CITADA

- Alcántar GG, Sandoval VM. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. Chapingo, México, 10 156 p.
- Alcántar-González G, Trejo-Téllez LI, Fernández-Pavía L, Rodríguez-Mendoza M.N. 2016. Elementos esenciales. Nutrición de Cultivos. Segunda Edición. Colegio de Postgraduados. pp. 23-55.
- Bailey RW. 1958. The reaction of pentoses with anthrone. *Biochemical Journal* 68(4): 669-672. doi: 10.1042/bj0680669.
- Bates LS, Waldren RP, Teare ID. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39: 205-207. doi: 10.1007/BF00018060
- Bremner J M. 1965. Total nitrogen. In: Black CA (ed.). *Methods of soil analysis. Part. 2. Agronomy 9.* American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, U. S. A. pp. 1049-1178.
- Chao L, Weiqian C, Yun L, Hao H, Liang C, Xiaoqing L, Fashui H. 2009. Cerium under calcium deficiency—influence on the antioxidative defense system in spinach plants. *Plant and Soil* 323(1-2): 285-294. doi: 10.1007/s11104-009-9937-9
- Chauvel C. 2018. Cerium. In: White WM (ed.). *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series.* Springer. Cham, Switzerland. pp. 226-229.
- Dai Y, Shen Z, Liu Y, Wang L, Hannaway D, Lu H. 2009. Effects of shade treatments on the photosynthetic capacity, chlorophyll fluorescence, and chlorophyll content of *Tetrastigma hemsleyanum* Diels et Gilg. *Environmental and Experimental Botany* 65(2-3): 77-182. doi: 10.1016/j.envexpbot.2008.12.008
- 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
- 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
- Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI. 2018. The role of beneficial elements in triggering adaptive responses to environmental stressors and improving plant performance. In: Vats S. (ed.), *Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants*, pp.137-172. Springer. doi: 10.1007/978-981-10-9029-5\_6

- Habashi F. 2013. Cerium, Physical and Chemical Properties. In: Kretsinger RH, Uversky VN, Permyakov EA. (eds.), *Encyclopedia of Metalloproteins*, pp. 588-588. Springer. doi: 10.1007/978-1-4614-1533-6
- Hardenburg RE, Watada AE, Wang CY. 1986. The commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks (No. 66). US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Hawkesford M, Horst W, Kichey T, Lambers H, Schjoerring J, Møller IS, White P. 2012. Functions of Macronutrients. In: Marschner's P. (Ed) *Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition*. Elsevier Inc. pp. 135–189. doi: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6
- Hong F, Liu C, Zheng L, Wang X, Wu K, Song W, Lü S, Tao Y, Zhao G. 2005. Formation of complexes of rubisco-rubisco activase from La<sup>3+</sup>, Ce<sup>3+</sup> treatment spinach. *Science in China Series B: Chemistry* 48(1): 67. doi: /10.1007/BF02990915
- Hong F, Wang L, Meng X, Wei Z, Zhao G. 2002a. The effect of cerium (III) on the chlorophyll formation in spinach. *Biological Trace Element Research* 89(3): 263-276. doi: 10.1385/bter:89:3:263
- Hong F, Wei Z, Zhao G. 2002b. Mechanism of lanthanum effect on chlorophyll of spinach. *Science in China Series C: Life Sciences* 45(2): 166. doi: 10.1360/02yc9019
- Hong J, Wang L, Sun Y, Zhao L, Niu G, Tan W, Rico CM, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL. 2016. Foliar applied nanoscale and microscale CeO<sub>2</sub> and CuO alter cucumber (*Cucumis sativus*) fruit quality. *Science of The Total Environment* 563-564: 904-911. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.029
- Hou K, Bao D, Shan C. 2018. Cerium improves the vase life of *Lilium longiflorum* cut flowers through ascorbate-glutathione cycle and osmoregulation in the petals. *Scientia Horticulturae* 227: 142-145. doi: 10.1016/j.scienta.2017.09.040
- Hu Z, Richter H, Sparovek G, 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. doi: 10.1081/PLN-120027555
- Huang H, Liu X, Qu C, Liu C, Chen L, Hong F. 2008. Influences of calcium deficiency and cerium on the conversion efficiency of light energy of spinach. *Biometals* 21(5): 553-561. doi: 10.1007/s10534-008-9141-z
- Kamenetsky R, Okubo H. 2013. Introduction. In: Kamenetsky R, Okubo H (eds.), *Ornamental Geophytes. From Basic Science to Sustainable Production*, pp. xv-xvii. CRC Press.
- Khan FU, Jhon AQ, Khan FA, Mir MM. 2006. Effect of NPK and Zn on growth, flowering and bulb production in tulip under polyhouse conditions in Kashmir. *Journal of Horticultural Sciences* 1(2): 129-134.
- Kilbourn BT. 2000. Cerium and cerium compounds. In: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, pp. 1-23. doi: 10.1002/0471238961.0305180911091202.a01.pub2

- Kretsinger RH. 2013. Calcium Homeostasis: Calcium metabolism In: Kretsinger RH, Uversky VN, Permyakov EA. (eds.), *Encyclopedia of Metalloproteins*, pp. 439-444. Springer. doi: 10.1007/978-1-4614-1533-6
- Ma Y, Xie C, He X, Zhang B, Yang J, Sun M, Luo W, Feng S, Zhang J, Wang G, Zhang Z. 2020. Effects of ceria nanoparticles and CeCl<sub>3</sub> on plant growth, biological and physiological parameters, and nutritional value of soil grown common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Small* 1907435. doi: 10.1002/smll.201907435
- Ma JJ, Ren YJ, Yan L Y. 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
- Mascarini L, Lorenzo G, Vilella F. 2005. Nitrogen concentration in nutrient solution, post-harvest life and flowers commercial quality in hydroponic gerbera. *Acta Horticulturae* 697: 371-375. doi: 10.17660/ActaHortic.2005.697.47
- Mutui TM, Emongor VE, Hutchinson MJ. 2006. The Effects of Gibberellin4+7 on the Vase Life and Flower Quality of *Alstroemeria* Cut Flowers. *Plant Growth Regulation* 48: 207–214. doi: 10.1007/s10725-006-0014-6
- Petridou M, Voyiatzi C, Voyiatzis D. 2001. Methanol, ethanol and other compounds retard leaf senescence and improve the vase life and quality of cut chrysanthemum flowers. *Postharvest Biology and Technology* 23(1): 79-83. doi: 10.1016/S0925-5214(01)00102-8
- Pilon-Smits EA, Quinn CF, Tapken W, Malagoli M, Schiavon M. 2009. Physiological functions of beneficial elements. *Current Opinion in Plant Biology* 12(3): 267-274. doi: 10.1016/j.pbi.2009.04.009
- Qu C, Liu C, Guo F, Hu C, Ze Y, Li C, Zhou G, Hong F. 2013. Improvement of cerium on photosynthesis of maize seedlings under a combination of potassium deficiency and salt stress. *Biological Trace Element Research* 155(1): 104-113. doi: 10.1007/s12011-013-9767-8
- Ramírez-Martínez M, Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI, Hernández I, Osorio B, Castillo AM, Hernández E. 2009. Effect of lanthane on quality of tulip flower 'Ile de France'. *Acta Horticulturae* 847: 295-300. doi: 10.17660/ActaHortic.2009.847.39
- Royal FloraHolland. 2016. Annual Report- Flowering the world. Disponible en línea en: <https://www.royalfloraholland.com/>. Consultado: abril de 2020.
- Salehi H, Chehregani A, Lucini L, Majd A, Gholami M. 2018. Morphological, proteomic and metabolomic insight into the effect of cerium dioxide nanoparticles to *Phaseolus vulgaris* L. under soil or foliar application. *Science of the Total Environment* 616: 1540-1551. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.159
- SAS Institute. 2013. Base SAS 9.4. Procedures Guide: Statistical Procedures Second edition. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 500 p.
- Shaheen R, Hassan I, Hafiz IA, Jilani G, Abbasi NA. 2015. Balanced zinc nutrition enhances the antioxidative activities in Oriental lily cut flower leading to improved growth and vase quality. *Scientia Horticulturae* 197: 644-649. doi: 10.1016/j.scienta.2015.10.030

- Shan C, Zhao X. 2015. Lanthanum delays the senescence of *Lilium longiflorum* cut flowers by improving antioxidant defense system and water retaining capacity. *Scientia Horticulturae* 197: 516-520. doi: 10.1016/j.scienta.2015.10.012
- SIAP. 2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Disponible en línea en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Consultado: Mayo de 2020.
- Steiner AA. 1984. The universal nutrient solution. In: Proceedings Sixth International Congress on Soilless Culture, ISOSC. Lunteren, Wageningen, The Netherlands, pp. 633-650
- Sumanta N, Haque CI, Nishika J, Suprakash R. 2014. Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvents. *Research Journal of Chemical Sciences* 4(9): 63-69.
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Alcántar-González G. 2016. Elementos benéficos: potencialidades y limitantes. In: Alcántar-González G, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC (eds), *Nutrición de cultivos*, Segunda edición, pp. 59-101. Biblioteca Básica de Agricultura
- Trejo-Téllez LI, Ramírez-Martínez M, Gómez-Merino FC. 2013. Caracterización de cultivares de tulipán (*Tulipa gesneriana* L.) en postcosecha. *AgroProductividad* 6(3): 29-36.
- Tyler G. 2004. Rare earth elements in soil and plant systems-A review. *Plant and Soil* 267(1-2): 191-206. doi: 10.1007/s11104-005-4888-2
- Wang Q, Mu J, Shan C, Wang W, Fu S. 2017. Effects of cerium on the antioxidant defence system in the petals and the contents of pigments in the calyces of *Rosa chinensis* Jacq. cut flower. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 92(6): 630-635. doi: 10.1080/14620316.2017.1338924
- Xiaoqing L, Hao H, Chao L, Min Z, Fashui H. 2009. Physico-chemical property of rare earths—effects on the energy regulation of photosystem II in *Arabidopsis thaliana*. *Biological Trace Element Research* 130(2): 141-151. doi: 10.1007/s12011-009-8321-1
- Xie C, Ma Y, Yang J, Zhang B, Luo W, Feng S, Zhang J, Wang G, He X, Zhang Z. 2019. Effects of foliar applications of ceria nanoparticles and  $CeCl_3$  on common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Environmental Pollution* 250: 530-536. doi: 10.1016/j.envpol.2019.04.042
- Xie Y, Li Y, Liu N, Zhang Y, Guo N, Wang T, Shang X. 2015. Effects of cerium nitrate on the growth and physiological characteristics in *Cyclocarya paliurus* seedlings. *Journal of Rare Earths* 33(8): 898–904. doi: 10.1016/S1002-0721(14)60502-0
- Xu Q, Jiang Y, Chu W, Su C, Hu D, Lu Q, Zhang T. 2017. Response of *Spirodela polyrhiza* to cerium: subcellular distribution, growth and biochemical changes. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 139: 56–64. doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.01.012
- Yang F, Ma ZN, Liu C, Wu C, Zhou J, Gao FQ, Hong FS. 2005. Effects of  $Ce^{3+}$  on chloroplast senescence of spinach under light. *Journal of Rare Earths* 22(4): 480–485.

- Zhang P, Ma Y, Liu S, Wang G, Zhang J, He X, Zhang J, Rui Y, Zhang Z. 2017. Phytotoxicity, uptake and transformation of nano-CeO<sub>2</sub> in sand cultured romaine lettuce. *Environmental Pollution* 220: 1400-1408. doi: 10.1016/j.envpol.2016.10.094
- Zhao L, Sun Y, Hernandez-Viezcas JA, Hong J, Majumdar S, Niu G, Duarte-Gardea M, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL. 2015. Monitoring the environmental effects of CeO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles through the life cycle of corn (*Zea mays*) plants and in situ  $\mu$ -XRF mapping of nutrients in kernels. *Environmental Science & Technology* 49(5): 2921-2928. doi: 10.1021/es5060226
- Zheng M, Guo Y. 2019. Effects of neodymium on the vase life and physiological characteristics of *Lilium Casa Blanca* petals. *Scientia Horticulturae* 256: 108553. doi: 10.1016/j.scienta.2019.108553
- Zheng M, Guo Y. 2018. Cerium improves the vase life of *Dianthus caryophyllus* cut flower by regulating the ascorbate and glutathione metabolism. *Scientia Horticulturae* 240: 492-495. doi: 10.1016/j.scienta.2018.06.046

## CONCLUSIÓN GENERAL

El suministro de Ce tanto en la solución nutritiva como de manera foliar tuvo efectos positivos y negativos en los parámetros de crecimiento y desarrollo, calidad poscosecha, estatus nutrimental y contenido de algunas biomoléculas, en el cultivo de tulipán cv. Jan van Nes. Estos efectos fueron dependientes de las concentraciones aplicadas, la etapa fenológica de la planta y formas de aplicación.

Al realizar las aplicaciones de Ce en la solución nutritiva se obtuvieron mejores resultados en los parámetros de crecimiento, desarrollo, contenido de azúcares solubles totales, clorofila, prolina, estatus nutrimental y calidad poscosecha en comparación al suministro de Ce vía foliar.

El Ce suministrado a una baja concentración (5  $\mu\text{M}$ ) en la solución nutritiva desde la plantación de los bulbos tuvo efectos estimulantes, al adelantar la brotación de los bulbos y el periodo de floración, aumentar las longitudes de las hojas del primer y segundo nudo, así como la longitud del botón floral a los 50 ddp, y la altura de planta a los 15 y 30 ddp; por tanto, el Ce tiene potencial para ser usado como un bioestimulante a bajas concentraciones para mejorar la calidad del cultivo de tulipán. En contraste, se observaron efectos negativos con una alta concentración de Ce (25  $\mu\text{M}$ ); al registrarse retraso en el periodo de floración, reducciones en la altura de planta a los 30, 40 y 50 ddp y en las longitudes de hojas del primer y segundo nudo a los 40 ddp. Por lo que se argumenta que, el Ce presenta un efecto hormético cuando es aplicado junto con la solución nutritiva.

En cambio, al aplicar Ce de manera foliar, los efectos de este elemento no están muy claros. Se registraron efectos negativos o bien ausencia de éstos en los parámetros de crecimiento y desarrollo al momento de realizar las aplicaciones foliares, es decir a los 40 ddp; una concentración de 5 y 15  $\mu\text{M}$  Ce retrasó la formación del botón floral, mientras que presentó un efecto nulo en la coloración y antesis de la flor, asimismo, tuvo un efecto nulo en la altura de planta, reducciones en las longitudes de hojas del primer y segundo nudo y en el diámetro de tallo a los 40 ddp. Después de este periodo, algunos de los parámetros mejoraron con las concentraciones de 15 y 25  $\mu\text{M}$  Ce; posiblemente la dosis bifásica de Ce dependa de la forma de aplicación.

La aplicación de 5 y 25  $\mu\text{M}$  Ce en la solución nutritiva durante el ciclo productivo de tulipán tuvo un efecto positivo en los parámetros de calidad poscosecha, al mejorar el diámetro y la longitud de botón, el diámetro de tallo, así como al aumentar el

consumo de agua, el peso fresco del tallo floral y mantener por más tiempo la masa fresca relativa de tallo, además de aumentar la biomasa fresca y seca de todos los órganos evaluados.

La aplicación de Ce vía foliar durante el ciclo productivo y sus efectos en los parámetros de calidad poscosecha fueron inconsistentes. Las diferentes concentraciones de Ce mostraron efectos tanto positivos como negativos en los parámetros de calidad poscosecha al momento de corte y durante la vida en florero, aunque estos efectos solo fueron evidentes hasta el día 4 en florero. Ninguna de las concentraciones y formas de aplicación de Ce incrementó la vida de florero.

El suministro de Ce en la solución nutritiva y vía foliar alteró el contenido nutrimental de los diferentes órganos de tulipán evaluadas al final de la vida de florero. Los mejores efectos en el estatus nutrimental se obtuvieron con los tratamientos 5 y 25  $\mu\text{M}$  suministrados junto con la solución nutritiva, se registraron incrementos significativos en el contenido de todos los macronutrientes en flor, hoja y tallo, al igual que el contenido de micronutrientes (Fe, Zn, Mn y B) en flor, el contenido de Mn en tallo y hoja; por el contrario, 15  $\mu\text{M}$  Ce causó reducciones en el contenido de Zn en hoja.

Por otra parte, las aplicaciones de las diferentes concentraciones de Ce de manera foliar redujeron el contenido de todos los macronutrientes en flor. En tallo y hoja el contenido de todos los macronutrientes y micronutrientes en los diferentes órganos evaluados se vieron influenciados de manera diferencial por la aplicación de Ce en el rango de 5 a 25  $\mu\text{M}$ .

Los contenidos de azúcares solubles totales, pigmentos fotosintéticos y prolina libre en hojas y flores de tulipán evaluados al final del ciclo productivo y al final de la vida de florero, aumentaron de manera significativa con altas concentraciones de Ce (25  $\mu\text{M}$ ) aplicadas tanto de manera foliar como en la solución nutritiva. Se sugieren realizar estudios más especializados a nivel morfológico y moleculares, para comprender los mecanismos que altas concentraciones de Ce desencadenan el contenido de biomoléculas de las plantas de tulipán.

Finalmente, con todas estas evidencias, se recomienda el uso de Ce en la solución nutritiva para mejorar aspectos de producción y calidad poscosecha de tulipán, sin embargo, se sugieren realizar más estudios en otras especies ornamentales, al igual que se debe prestar especial atención en encontrar una dosis adecuada para alargar la vida útil de la flor tanto en florero como en maceta.

Respecto al suministro foliar de Ce, se sugiere adicionar más concentraciones, evaluar diferentes intervalos y periodos de aplicación, e incluir estudios morfológicos y anatómicos de la hoja.