



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

SOLUCIONES NUTRITIVAS EN LA PRODUCCIÓN DE PAK CHOI (*Brassica rapa subespecie chinensis* L.) Y KALE (*Brassica oleracea var. acephala*) CULTIVADAS EN SUSTRATO BAJO INVERNADERO

JUAN MARTÍNEZ CASTILLO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2021

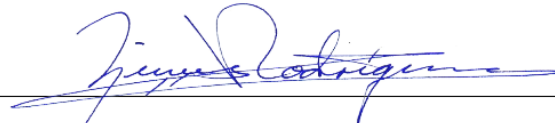
La presente tesis titulada “**Soluciones nutritivas en la producción de pak choi (*Brassica rapa* subespecie chinensis L.) y kale (*Brassica oleracea* var. acephala) cultivadas en sustrato bajo invernadero**” realizada por el alumno: Juan Martínez Castillo bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

EDAFOLOGÍA

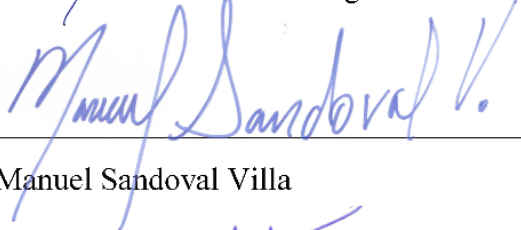
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA



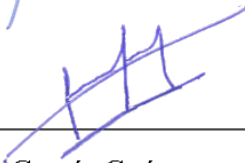
Dra. María de las Nieves Rodríguez Mendoza

ASESOR



Dr. Manuel Sandoval Villa

ASESOR



Dr. José Luis García Cué

Montecillo, Texcoco, Estado de México, septiembre de 2021

SOLUCIONES NUTRITIVAS EN LA PRODUCCIÓN DE PAK CHOI (*Brassica rapa subespecie chinensis L.*) Y KALE (*Brassica oleracea var. acephala*) CULTIVADAS EN SUSTRATO BAJO INVERNADERO

Juan Martínez Castillo, M.C
Colegio de postgraduados, 2021

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo analizar diferentes soluciones nutritivas en el desarrollo, producción y concentración nutrimental de plantas de pak choi (*Brassica rapa subespecie Chinensis L.*) y kale (*Brassica oleracea var. acephala*) en sustrato en condiciones de invernadero. El estudio se dividió en dos experimentos. En el primer experimento se midió el efecto de la conductividad eléctrica (CE) (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 dS·m⁻¹) en los cultivos de pak choi y kale, las variables evaluadas en el desarrollo de pak choi fueron lecturas SPAD, peso fresco, área foliar, diámetro de tallo, peso seco de tallo y hoja y K⁺ en extracto celular de pecíolo (ECP), donde se demostró que una CE de 2.0 dS·m⁻¹, tuvieron mayor valor estas variables, una CE de 1.5 dS·m⁻¹ generó mayor producción de raíces (volumen, longitud y peso seco), y a una CE de 0.5 dS·m⁻¹ tuvo mayor concentración de Ca²⁺ en ECP y mayor resistencia a la penetración. En el caso del kale a una CE de 2.0 dS·m⁻¹ hubo mayores lecturas SPAD, peso fresco, peso seco de hoja, tallo y raíz, volumen radical, diámetro de tallo, así como un mayor número de hojas comerciales, de mayor longitud, ancho y peso fresco. La producción en ambos cultivos, a una CE de 2.0 dS·m⁻¹ hubo mayor rendimiento y en tejido vegetal, el N fue mayor a una CE de 2.0 dS·m⁻¹, así como los NO₃⁻ en ambos cultivos. En el segundo experimento se cuantificó el desarrollo de pak choi, evaluando peso fresco, área foliar, diámetro de tallo y resistencia a la penetración con los valores mayores a una relación 75/25 y 50/50, hubo mayores pesos secos a una relación 75/25 y los rendimientos a 75/25 y 50/50. En el kale se tuvieron los mayores pesos frescos a 50/50 y 25/75, mayor volumen y longitud radical a 75/25 y no hubo diferencias significativas en las hojas comerciales (número de hojas, longitud, ancho y peso fresco), los NO₃⁻ y K⁺ en ECP de pak choi fueron mayores en 25/75 y en Ca²⁺ no hubo diferencias al igual que en kale, con mayor concentración de NO₃⁻ y K⁺ en 75/25. En pak choi hubo mayor concentración de N, P, Fe, Zn y Mn en 25/75 y Mg en 75/25. La cinética de producción de hojas de pak choi y kale fue mayor a 2.0 dS·m⁻¹ y a 75/25 y 50/50.

Palabras clave: conductividad eléctrica, relación NO₃⁻/NH₄⁺, rendimiento, extracto celular de pecíolo.

NUTRIENT SOLUTIONS IN THE PRODUCTION OF PAK CHOI (*Brassica rapa subspecies chinensis L.*) AND KALE (*Brassica oleracea var. acephala*) GROWN IN A SUSTRATE UNDER GREENHOUSE

Juan Martínez Castillo, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2021

ABSTRACT

The present investigation analyzed nutrient solutions concentration in the development, yield and nutrient concentration of pak choi (*Brassica rapa subspecies Chinensis L.*) and kale (*Brassica oleracea var. acephala*) plants in greenhouse conditions. The study was divided into two experiments. In the first experiment, the effect of four electrical conductivities (EC) (0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 dS·m⁻¹) in pak choi and kale crops were measured, the determinations were divided into three aspects, the variables evaluated in the development of pak choi were SPAD readings, fresh weight, leaf area, stem diameter, stem dry weight and K⁺ in petiole sap (PS), where it was demonstrated that an EC of 2.0 dS·m⁻¹, these variables had a higher value, an EC of 1.5 dS·m⁻¹ increased root volume, length and dry weight, and at an EC of 0.5 dS·m⁻¹ there was a higher concentration of Ca²⁺ in PS and greater resistance to penetration. In the case of kale, at an EC of 2.0 dS·m⁻¹ there were higher SPAD readings, fresh weight, dry weight of leaf, stem and root, root volume, stem diameter, as well as a greater number of commercial leaves, of greater length, width and fresh weight. In the variable production in both crops, at a EC of 2.0 dS·m⁻¹ there was a higher yield and in plant tissue, the N was higher than a EC of 2.0 dS·m⁻¹, as well as NO₃⁻ in both crops. In the second experiment, the development of pak choi was quantified, evaluating the variables of fresh weight, leaf area, stem diameter and resistance to penetration with values greater than a 75/25 and 50/50 ratio, the dry weights had greater values at a 75/25 ratio and yield in the same way at 75/25 and 50/50. The kale had the highest fresh weights at 50/50 and 25/75, greater volume and root length at 75/25 and there were no significant differences in commercial leaves (number of leaves, length, width and fresh weight), NO₃⁻ and K⁺ in pak choi PS were higher in 25/75 and in Ca²⁺ there were no differences, as in kale, where the highest concentration of NO₃⁻ and K⁺ was found with 75/25. In pak choi there was a higher concentration of N, P, Fe, Zn, and Mn in 25/75 and Mg in 75/25. The yield kinetics of pak choi and kale leaves was higher at 2.0 dS·m⁻¹ and at 75/25 and 50/50.

Keywords: Electrical conductivity, NO₃⁻ / NH₄⁺ ratio, yield, petiole sap.

AGRADECIMIENTOS

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo por permitirme ser parte de su comunidad estudiantil y brindarme formación académica y profesional.

A la Dra. María de las Nieves Rodríguez Mendoza a quien agradezco su entera disposición, su infinito apoyo para dirigir la presente investigación y poder concluir mis estudios de maestría. Además de tener una calidad humana y una trayectoria profesional que me ha inspirado a superarme día con día.

Al Dr. Manuel Sandoval Villa a quien agradezco sus oportunas intervenciones durante la realización de la investigación en campo para la mejora y éxito de la misma.

Al Dr. José Luis García Cué a quien agradezco todo el tiempo brindado, así como su paciencia y dedicación para que el trabajo resultara mejor.

A todos los profesores que de alguna manera contribuyeron en mi formación profesional.

A mi familia por todo el apoyo incondicional, y quienes siempre me apoyaron y alentaron para culminar mis estudios.

A los amigos que aquí encontré y que forjé amistad, quienes me apoyaron en la realización de la investigación.

A todos los trabajadores de campo y laboratorio quienes sin su ayuda y consejos no hubiera culminado con éxito la presente investigación.

DEDICATORIA

A mi hijo Juan Joaquín Martínez Cabrera quien ha sido el motor de mi vida y quien me motiva a superarme personal y profesionalmente con todo el amor que día a día me da.

A mi esposa Jazmín Esveldy Cabrera Rivera, quien es la persona con quien he compartido gran parte de mi vida y la más especial en mi corazón, que con su amor y sabiduría hemos caminado juntos y logrado metas.

A mis padres Rufina Castillo Barrios y J. Isabel Martínez Amaro quienes nunca me han dejado solo en la vida y que siempre recibo el apoyo incondicional en cada paso que doy, por su amor y protección.

A mis suegros Joaquín Cabrera Lagos (†) y Juana Carolina Rivera Mejía quienes me han apoyado en todo momento y que me han recibido como un miembro más de su familia, hasta el cielo para mi suegro quien fue una persona excepcional en todos los sentidos y que siempre conté con su apoyo.

A mis hermanos Mónica, Gerardo, Teresa y Ángela por todo su apoyo, por estar siempre en los buenos y malos momentos juntos y por ser parte importante de mi familia.

A mi tía Agustina Martínez Serrano por su apoyo incondicional.

A mis cuñadas Alina y Nancy por el gran afecto y lazos que hemos construido y el apoyo que me han brindado.

A mis sobrinos Melany, José Rubén, Osvaldo, Vania, Caleb y Fátima de quienes he recibido su cariño y afecto en todo momento y que espero en un futuro ser inspiración para su vida.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
DEDICATORIA.....	vi
LISTA DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xvi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos particulares.....	3
Hipótesis general.....	4
Hipótesis particulares.....	4
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
3.1 Descripción botánica y taxonómica de los cultivos de pak choi y kale.....	5
3.2 Valor nutrimental del pak choi y el kale.....	6
3.3 Usos y aplicaciones de brassicas.....	6
3.4 Producción de pak choi y kale en México.....	8
3.5 Producción de cultivos sin suelo.....	8
3.6 Solución nutritiva.....	11
3.7 Conductividad eléctrica.....	12
3.8 Factores que influyen en la producción de los cultivos del género Brassica.....	13
3.9 Relación nitratos-amonio en los cultivos.....	15
3.10 Nitratos.....	16
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
4.1. Experimento 1. Conductividad eléctrica de la solución nutritiva Steiner en el desarrollo, producción y concentración nutrimental de plantas de pak choi y kale.....	18
4.1.1. Ubicación de la investigación y condiciones experimentales.....	18
4.1.2. Material vegetal.....	19
4.1.3. Análisis de agua.....	19
4.1.4. Diseño de tratamientos.....	20

4.1.5.	Diseño experimental.....	21
4.1.6.	Manejo del cultivo	22
4.1.7.	VARIABLES EVALUADAS.....	27
4.1.8.	Análisis de datos	32
4.2.	Experimento 2. Relación nitrato-amonio de la solución nutritiva Steiner en el desarrollo, producción y concentración nutrimental de plantas de pak choi y kale.....	33
4.2.1.	Ubicación de la investigación y condiciones experimentales.....	33
4.2.2.	Material vegetal	33
4.2.3.	Análisis de agua	34
4.2.4.	Diseño de tratamientos.....	34
4.2.5.	Diseño experimental.....	34
4.2.6.	Manejo del cultivo	35
4.2.7.	VARIABLES EVALUADAS.....	38
4.2.8.	Análisis de datos	39
4.3.	Cinética de producción de hojas de pak choi y kale en función de la conductividad eléctrica y de la relación nitrato/amonio.....	40
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
5.1	Experimento 1. Conductividad eléctrica de la solución nutritiva Steiner en el desarrollo, producción y concentración nutrimental de plantas de pak choi y kale.....	41
5.1.1	Pak choi.....	41
5.1.1.1	VARIABLES DE DESARROLLO	41
5.1.1.2	Variable de producción.....	50
5.1.1.3	Concentración nutrimental.....	51
5.1.2	Kale.....	58
5.1.2.1	VARIABLES DE DESARROLLO	58
5.1.2.2	Variable de producción.....	68
5.1.2.3	Concentración nutrimental.....	69
5.2	Experimento 2. Relación nitrato/amonio de la solución nutritiva Steiner en plantas de pak choi y kale.....	76
5.2.1	Pak choi.....	76
5.2.1.1	VARIABLES DE DESARROLLO	76

5.2.1.2	Variable de producción	83
5.2.1.3	Concentración nutrimental.....	84
5.2.2	Kale.....	90
5.2.2.1	Variables de desarrollo	90
5.2.2.2	Variable de producción.....	97
5.2.2.3	Concentración nutrimental.....	98
5.3	Cinética de producción de hojas.....	104
5.3.1	Cinética de producción de hojas en función de la conductividad eléctrica de la solución Steiner.....	104
5.3.2	Cinética de producción de hojas en función de la relación nitrato/amonio de la solución Steiner.....	106
6.	CONTRASTE DE HIPÓTESIS CON RESULTADOS	108
7.	CONCLUSIONES	110
8.	RECOMENDACIONES	111
9.	LITERATURA CITADA.....	112

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del pak choi y el kale.	5
Cuadro 2. Composición nutrimental por ración de 100 g en crudo de pak choi y kale.	7
Cuadro 3. Producción de pak choi (2017) y kale (2019) en México.	8
Cuadro 4. Análisis químico de agua de pozo del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México del mes de septiembre 2020.	20
Cuadro 5. Volumen de solución nutritiva incorporado a las macetas a través del ciclo de cultivo del pak choi y kale producidos en perlita, bajo invernadero.	24
Cuadro 6. Miliequivalentes por litro de las fuentes de fertilizantes de macronutrientes para la preparación de 1L de la solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas.	25
Cuadro 7. Formulación de los productos utilizados en la producción de pak choi y kale.	26
Cuadro 8. Productos aplicados al pak choi y kale producidos en perlita bajo invernadero.	26
Cuadro 9. Volumen de solución nutritiva incorporado a las macetas a través del ciclo de cultivo del pak choi y kale producidos en sustrato de perlita, bajo invernadero en el segundo experimento.	36
Cuadro 10. Fuentes de fertilizantes de macronutrientes para la preparación de 1L de la solución Steiner a diferentes relaciones nitrato/amonio.	37
Cuadro 11. Productos aplicados al pak choi y kale producidos en sustrato de perlita bajo invernadero.	38
Cuadro 12. Diámetro de tallo y resistencia a la penetración en plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.	47
Cuadro 13. Volumen, longitud y peso seco de raíz en plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.	49
Cuadro 14. Rendimiento de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.	50

Cuadro 15. Concentración de N, P y K en parte aérea de plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	54
Cuadro 16. Concentración de Ca, Mg y S en parte aérea de plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.	54
Cuadro 17. Concentración de nitratos (NO₃⁻) en plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	55
Cuadro 18. Concentración de Fe, Cu, Zn y Mn en parte aérea de plantas de pak choi a los 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.	57
Cuadro 19. Concentración de B y Mo en parte aérea de plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	58
Cuadro 20. Concentración de potasio (K⁺) en ECP de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	61
Cuadro 21. Resistencia a la penetración en plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	64
Cuadro 22. Peso seco de tallo, peso seco de hoja y peso seco de raíz en plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.	65
Cuadro 23. Volumen radical y longitud radical en plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	66
Cuadro 24. Determinaciones en hojas comerciales en plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	68

Cuadro 25. Rendimiento comercial de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	69
Cuadro 26. Concentración de N, P y K en parte aérea de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	71
Cuadro 27. Concentración de Mg y S en parte aérea de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	71
Cuadro 28. Concentración de calcio (Ca) en plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	72
Cuadro 29. Concentración de nitratos (NO₃⁻) en plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	73
Cuadro 30. Concentración de Fe, Cu, Zn y Mn en parte aérea de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.	75
Cuadro 31. Concentración de B y Mo en parte aérea de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	75
Cuadro 32. Concentración de calcio (Ca²⁺) en ECP de plantas de pak choi a 51 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones nitrato/amonio y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	79
Cuadro 33. Peso fresco (PF), Área foliar (AF), Diámetro de tallo (DT) y resistencia a la penetración (RP) en plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones NO₃⁻/NH₄⁺ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.	81
Cuadro 34. Peso seco de hoja (PSH), volumen radical (VR) y longitud radical (LR) en plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes	

relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	82
Cuadro 35. Peso seco de raíz (PSR) y peso seco de tallo (PST) en plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	83
Cuadro 36. Rendimiento de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	84
Cuadro 37. Concentración de N, P y K en parte aérea de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	86
Cuadro 38. Concentración de Ca, Mg y S en parte aérea de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	87
Cuadro 39. Concentración de NO_3^- en parte aérea de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	88
Cuadro 40. Concentración de Fe, Zn y Mn en parte aérea de plantas de pak choi a los 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	89
Cuadro 41. Concentración de B y Mo en parte aérea de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	90
Cuadro 42. Concentración de Ca^{2+} y K^+ en ECP de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	92
Cuadro 43. Concentración de NO_3^- en ECP de plantas de kale a 58 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	93

Cuadro 44. Peso fresco (PF) y resistencia a la penetración (RP) de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	94
Cuadro 45. Peso seco de hoja (PSH), peso seco de raíz (PSR), volumen radical (VR) y longitud radical (LR) de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	95
Cuadro 46. Peso fresco de hojas comerciales (PFHC), número de hojas comerciales (NHC), longitud de hojas comerciales (LHC) y ancho de hojas comerciales (AHC) de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	96
Cuadro 47. Peso seco de tallo (PST) y diámetro de tallo (DT) de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	97
Cuadro 48. Rendimiento comercial de kale a 59 ddt regados con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	98
Cuadro 49. Concentración de N, P y K en parte aérea de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	99
Cuadro 50. Concentración de Ca, Mg y S en parte aérea de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	100
Cuadro 51. Concentración de NO_3^- en parte aérea de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	101
Cuadro 52. Concentración de Fe, Cu y Zn en parte aérea de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	102

Cuadro 53. Concentración de Mn, B y Mo en parte aérea de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.....	103
---	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Temperatura mínima y máxima y humedad relativa máxima en el lapso de producción de almácigos hasta cosecha registradas en invernadero en el primer experimento (26 de agosto a 9 de noviembre de 2020).	19
Figura 2. Diseño experimental completamente al azar del cultivo de pak choi con cuatro tratamientos y 10 repeticiones.....	21
Figura 3. Diseño experimental completamente al azar del cultivo de kale con cuatro tratamientos y 10 repeticiones.....	21
Figura 4. Distribución de los tratamientos en las unidades experimentales: a) cultivo de pak choi, b) cultivo de kale en condiciones de invernadero.	22
Figura 5. Almácigos de pak choi y kale a 11 días después de la siembra, con un alto porcentaje de germinación y emergencia (97.3% y 94% respectivamente).	22
Figura 6. Trasplante de los cultivos en sustrato de perlita: a) Vista panorámica de los bancales, b) plántulas de pak choi con dos pares de hojas verdaderas, c) plántulas de kale con dos pares de hojas verdaderas.	23
Figura 7. Cultivos a la cosecha desarrollados con soluciones nutritivas a diferente CE, a) plantas de pak choi a los 47 ddt; b) plantas de kale a los 54 ddt.....	27
Figura 8. Determinación de las variables agronómicas al momento de la cosecha de pak choi y kale: a) Peso fresco de pak choi, b) Diámetro de tallo de pak choi, c) Resistencia a la penetración en pak choi, d) Número de hojas de pak choi, e) Volumen de la raíz de pak choi, f) Longitud de la raíz de pak choi, g) Área foliar de pak choi, h) Peso seco de hoja de pak choi, i) Longitud de hojas comerciales de kale, j) Peso y número de hojas comerciales de kale, k) Ca y K en ECP en kale y l) Lecturas SPAD en kale.	30
Figura 9. Curva de calibración de nitratos para el método de Cataldo.	31
Figura 10. Temperatura mínima y máxima y humedad relativa máxima en el lapso de producción de almácigos hasta cosecha registradas en invernadero en el segundo experimento (12 de febrero al 12 de abril de 2021).	33

Figura 11. Diseño experimental completamente al azar del cultivo de pak choi con tres tratamientos y 14 repeticiones.....	34
Figura 12. Diseño experimental completamente al azar del cultivo de kale con tres tratamientos y 14 repeticiones.....	35
Figura 13. Lecturas SPAD en hojas de pak choi a 40 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.....	42
Figura 14. Concentración de calcio (Ca^{2+}) y potasio (K^+) en ECP de plantas de pak choi a 44 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.	43
Figura 15. Peso fresco de plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.....	44
Figura 16. Área foliar de plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.....	45
Figura 17. Peso seco de tallo (PST) y peso seco de hoja (PSH) de plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.....	48
Figura 18. Lecturas SPAD en hojas de kale a 40 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en	

condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.....	59
Figura 19. Concentración de calcio (Ca^{2+}) en ECP de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) En la gráfica se indica el error estándar.	60
Figura 20. Peso fresco de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.	62
Figura 21. Diámetro de tallo de plantas de kale a los 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.....	63
Figura 22. Lecturas SPAD de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra para un mismo muestreo son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.	76
Figura 23. Concentración de nitratos (NO_3^-) y potasio (K^+) en ECP de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra para cada nutrimento son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.	78
Figura 24. Lecturas SPAD de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra para un mismo muestreo son	

estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.	91
Figura 25. Cinética de producción de hojas en plantas de pak choi producidas en perlita en condiciones de invernadero en función de tres fechas y cuatro CE de la solución nutritiva Steiner.....	104
Figura 26. Cinética de producción de hojas en plantas de kale producidas en perlita en condiciones de invernadero en función de tres fechas y cuatro CE de la solución nutritiva Steiner.....	105
Figura 27. Cinética de producción de hojas en plantas de pak choi producidas en perlita en condiciones de invernadero en función de cuatro fechas y tres relaciones $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+$ de la solución nutritiva Steiner.....	106
Figura 28. Cinética de producción de hojas en plantas de kale producidas en perlita en condiciones de invernadero en función de cuatro fechas y tres relaciones $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+$ de la solución nutritiva Steiner.....	107

1. INTRODUCCIÓN

Las Brassicas son cultivos que, por sus propiedades benéficas para la salud humana, han tenido un papel importante y un consumo en aumento en los años recientes, en especial el kale.

En México, la producción de pak choi y kale ha sido en campo bajo riego principalmente en los estados de Guanajuato y Baja California (SIAP, 2020), con poca superficie sembrada para su explotación, lo que limita el acceso a su consumo, pues la mayoría de la producción se destina para exportación. Por otra parte, conocer íntegramente el manejo de los cultivos permitirá mejores cosechas.

Se ha demostrado el aumento de los rendimientos en hortalizas de hoja (arúgula o rúcula: *Eruca vesicaria ssp. sativa*) en sistemas de producción sin suelo en comparación con aquellos cultivados en suelo (Nicola *et al.*, 2005), además de los sistemas hidropónicos, que han sido de gran utilidad en la producción de hortalizas de hoja (Parks y Murray, 2011), en donde el principal elemento de estos sistemas es la solución nutritiva (López, 2018) y un mejor aprovechamiento de los materiales, aunque con un conocimiento del pH y la conductividad eléctrica (CE), así como tener una alta calidad del agua y fertilizantes (Ikeda, 2007).

El conocimiento de los niveles óptimos de nutrición de los cultivos antes mencionados, es de vital importancia para tener éxito en las cosechas, la CE ha sido factor indispensable ya que se ha visto el efecto que tienen sobre la producción de hortalizas de hoja como por ejemplo en vegetales de hoja asiática como el pak choi (Parks y Murray, 2011), donde a CE bajas o muy altas impacta de manera negativa en la producción de pak choi (Ding, 2018), así como en otro cultivos, donde un aumento de la CE afecta el rendimiento de pimiento morrón al ser sensible a la salinidad (Pérez-Vázquez *et al.*, 2020). Por otra parte, la forma de nitrógeno (N) suministrado a la solución nutritiva (SN) es importante, pues existen cultivos como la lechuga que a la adición de porcentajes de amonio a la solución pueden disminuir la concentración de nitratos, pero a su vez reduce el rendimiento (Lara-Izaguirre *et al.*, 2019), lo que impacta en el bolsillo del productor, por ello es necesario determinar qué relación nitrato/amonio ($\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$) beneficia la producción de pak choi y kale y que a su vez tenga los nutrimentos necesarios para su consumo.

La información de producción de pak choi y kale en México es escasa, por tanto, se desea probar el efecto de diferentes SN con la intención de obtener resultados que permitan encontrar los niveles

óptimos de nutrición para altos rendimientos en un ambiente protegido. Por otra parte, al ser cultivos nutraceuticos y no tener mucha proyección en México se pretende sentar las bases para que agricultores las produzcan y su consumo se extienda no solo en alguna región o estrato social.

Ante esta situación se ha propuesto la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué efecto tienen diferentes soluciones nutritivas en el desarrollo, producción y concentración nutrimental tanto de plantas de pak choi (*Brassica rapa subespecie Chinensis L.*) cómo de kale (*Brassica oleracea var acephala*) cultivadas bajo invernadero?

Para dar respuesta a la interrogante, se ha realizado una investigación en condiciones de invernadero para comparar en primera instancia la CE de la SN y posteriormente la relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ que permita obtener un mejor desarrollo, una mayor producción y concentración nutrimental adecuada de pak choi y kale.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

Analizar el efecto de diferentes concentraciones de la solución nutritiva en el desarrollo, producción y concentración nutrimental tanto de plantas de pak choi (*Brassica rapa subespecie Chinensis L.*) como de kale (*Brassica oleracea var. acephala*) cultivadas bajo invernadero.

Objetivos particulares

1. Medir el efecto que tienen diferentes conductividades eléctricas de la solución nutritiva Steiner en el desarrollo, producción y concentración nutrimental de plantas de pak choi y de kale cultivadas bajo invernadero.
2. Cuantificar el desarrollo, producción y concentración nutrimental de plantas de pak choi y de kale producidos con diferentes relaciones de nitrato y amonio de la solución nutritiva Steiner bajo condiciones de invernadero.
3. Describir la cinética de crecimiento tanto de plantas de pak choi como de kale de acuerdo con diferentes conductividades eléctricas y diferentes relaciones de nitrato y amonio de la solución nutritiva Steiner cultivadas bajo invernadero.

Hipótesis general

Las diferentes concentraciones de la solución nutritiva producen un efecto similar en el desarrollo, producción y concentración nutrimental tanto de plantas de pak choi (*Brassica rapa subespecie Chinensis L.*) como de kale (*Brassica oleracea var. acephala*) cultivadas bajo invernadero.

Hipótesis particulares

1. La conductividad eléctrica de $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de la solución nutritiva Steiner favorece un mejor desarrollo, producción y concentración nutrimental tanto de plantas de pak choi como de kale cultivadas bajo invernadero.
2. La relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ 75/25 de la solución nutritiva Steiner facilita un mejor desarrollo, producción y concentración nutrimental tanto de plantas de pak choi como de kale cultivadas bajo invernadero.
3. La cinética de crecimiento tanto de plantas de pak choi como de kale son similares de acuerdo con diferentes conductividades eléctricas y diferentes relaciones de nitrato y amonio de la solución nutritiva Steiner cultivadas bajo invernadero.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Descripción botánica y taxonómica de los cultivos de pak choi y kale

El pak choi y el kale son cultivos del género *Brassica*, como se describe en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del pak choi y el kale.

	Pak choi	Kale
Reino	Plantae	Plantae
Filo	Tracheophyta	Tracheophyta
Clase	Magnoliopsida	Magnoliopsida
Orden	Brassicales	Brassicales Bromhead
Familia	Brassicaceae	Brassicaceae
Género	<i>Brassica</i>	<i>Brassica</i>
Especie	<i>Brassica rapa L.</i>	<i>Brassica oleracea L.</i>
Subespecie/variedad	<i>Brassica rapa subsp. chinensis (L.)</i>	<i>Brassica oleracea var. acephala.</i>

Fuente: Warwick *et al.* (2019).

Las Brassicas son un género de hortalizas, que taxonómicamente se encuentran dentro de la familia de las Brassicaceae o también conocidas como verduras crucíferas (Fahey, 2016). Una característica propia de las Brassicas es que tiene metabolitos secundarios únicos de forma natural, llamados glucosinolatos (tiohidroximatos de S-glucopiranosilo), que son glucósidos ligados a S (Ishida *et al.*, 2014) y que al hidrolizarse producen aceites que le confieren el sabor y el olor característico de dichos vegetales (Fahey, 2016), además contienen altas concentraciones de antioxidantes (Casajús *et al.*, 2021).

El pak choi, pertenece al grupo Chinensis y se cultiva como planta anual, debido a sus hojas comestibles (Fordham y Hadley, 2003), las cuales se consumen en fresco, siendo un cultivo frondoso con enormes nervaduras centrales de color blanco y carnosas, alcanzan alturas de hasta 60 cm y pesos de 2 kg (Fahey, 2016), aunque existen de varios tamaños, formas de hojas y tallos, los cuales pueden ser blancos o verdes. La cosecha se hace recolectando las hojas individuales o la planta entera, así como se pueden recoger los brotes de floración ya que también son comestibles

(Fordham y Hadley, 2003). El kale de la variedad sabellica, es una planta Brassica que puede alcanzar de los 30 a 40 cm de altura (Reyes-Munguía *et al.*, 2017), hasta 1.25 m y que no forma cabeza (Fahey, 2016), una característica propia del cultivo es que sus hojas son verdes rizadas, las cuales son firmes, grandes y algo fibrosas, cuando están en una etapa más desarrollada y no tanto cuando son pequeñas (Reyes-Munguía *et al.*, 2017). Comercialmente se encuentran disponibles como hojas frescas, enlatadas o congeladas (Fahey, 2016), para hacer la recolección de hojas frescas comerciales, éstas deben alcanzar un tamaño de entre 10 y 15 cm de largo y la cosecha comienza con las hojas más bajas y extensas (Casajús *et al.*, 2021).

3.2 Valor nutrimental del pak choi y el kale

Los cultivos como el pak choi y el kale tienen importancia en la salud humana, debido a la capacidad antioxidante que poseen. Dentro de los principales antioxidantes se encuentran los compuestos fenólicos y el ácido ascórbico, así como el aporte de fibra dietética (Casajús *et al.*, 2021), compuestos carotenoides (Neugart *et al.*, 2018) y flavonoides, antocianinas y glucosinolatos (Zheng *et al.*, 2018). En el Cuadro 2 se describe la composición, los minerales, las vitaminas y los pigmentos del pak choi y kale.

3.3 Usos y aplicaciones de brassicas

Los vegetales crucíferos o Brassicas contienen compuestos organosulfurados en diferentes cantidades. Estos a altas concentraciones tienen efectos antiinflamatorios y reducción del dolor, por lo que puede incorporarse a la dieta en cantidades suficientes (Totsch *et al.*, 2015). También se ha correlacionado el consumo de las crucíferas con un mejor rendimiento cognitivo en personas de edad avanzada (Bonetti *et al.*, 2017), y se ha encontrado una fuerte relación entre la ingesta de estos vegetales y la reducción de riesgo de cáncer de próstata (Wong *et al.*, 2003), al igual se recomienda incluirlo en la dieta de personas con Parkinson, por ser un alimento rico en antioxidantes (Pizzorno *et al.*, 2016). Temple y Saigal., (2018) mencionan que se debe ser cuidadoso con el consumo en exceso de este tipo de vegetales, como por ejemplo el pak choi puede ocasionar enfermedades como el hipotiroidismo o algún tipo de coma si se consume en exceso.

Cuadro 2. Composición nutrimental por ración de 100 g en crudo de pak choi y kale.

Nutriente	pak choi	kale
Composición bruta		
Agua (g)	95.320	84.040
Energía (kcal)	13.000	49.000
Proteínas (g)	1.500	4.280
Lípidos totales (g)	0.200	0.930
Carbohidratos (g)	2.180	8.750
Fibra total dietética (g)	1.000	3.600
Azúcares totales (g)	1.180	2.260
Minerales		
Calcio (mg)	105.000	150.000
Hierro (mg)	0.800	1.470
Magnesio (mg)	19.000	47.000
Fósforo (mg)	37.000	92.000
Potasio (mg)	252.000	490.000
Sodio (mg)	65.000	38.000
Zinc (mg)	0.190	0.560
Cobre (mg)	0.021	0.499
Manganeso (mg)	0.159	0.659
Vitaminas		
Vitamina C (mg)	45.000	120.000
Folatos (µg)	66.000	141.000
Vitamina A, RE (µg)	223.000	500.000
Pigmentos (carotenoides)		
β-Carotenos (µg)	2681.000	5927.000
Luteína/zeaxantina (µg)	40.000	8198.000

Fuente: Fahey, 2016.

3.4 Producción de pak choi y kale en México

El pak choi en México se siembra a cielo abierto bajo riego. El estado de Guanajuato es el único productor al cierre del año 2017 con una producción de 459.73 t y con un mercado nacional. Para el kale de igual manera se siembra a cielo abierto bajo riego, con una producción de 1,365.92 t (Cuadro 3), con Guanajuato y Baja California, los productores al cierre del 2019, con un mercado nacional y de exportación (SIAP, 2020).

Cuadro 3. Producción de pak choi (2017) y kale (2019) en México.

Cultivo	Superficie Sembrada (ha)	Superficie Cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	PMR (\$/t)	Valor de la producción (miles de pesos)
Pak choi	18.5	18.5	459.73	24.85	5,850.00	2,689.42
Kale	83	83	1,365.92	16.46	8,344.62	11,398.08

PMR = Precio medio rural (SIAP, 2020).

3.5 Producción de cultivos sin suelo

El cultivo sin suelo es todo aquel sistema de crecimiento de las plantas fuera de su ambiente natural, por lo que sistemas como hidropónico, aeropónico, entre otros, son considerados dentro de estos sistemas (Urrestarazu, 2015). La hidroponía es una técnica que reemplaza al suelo, por agua con nutrientes minerales esenciales llamada solución nutritiva (López, 2018).

Los sistemas hidropónicos proporcionan agua, nutrientes y oxígeno para el buen funcionamiento de las plantas, un sistema hidropónico “Nutrient Film Technique” (NFT) es útil para vegetales de hoja asiática (Parks y Murray, 2011).

Algunos sistemas de producción hidropónicos hacen uso de sustratos para el crecimiento de los cultivos, dentro de estos pueden existir sustratos orgánicos (turba, fibra de coco, corteza, fibra de madera, etc.), sustratos inorgánicos (lana de roca, piedra pómez, arena, perlita, vermiculita, arcilla

expandida) y sustratos sintéticos (poliuretano, poliestireno). En su mayoría estos sistemas son abiertos puesto que la solución nutritiva no es recuperada por el sistema (Parks y Murray, 2011).

Kowalczyk *et al.* (2016) compararon un sistema NFT con sustratos como fibra de coco y lana de roca y encontraron que tres cultivares de lechuga (dos de mantecosa y una de batavia) obtienen un mayor rendimiento en un sistema NFT, además de que en la fibra de coco el peso seco de las lechugas es menor; una ventaja que encontraron en la investigación fue que a cinco días de la cosecha el uso de agua en sustitución de solución nutritiva reduce el contenido de nitratos en el sistemas NFT al solamente recircular agua, caso contrario con la fibra de coco.

Los sistemas de cultivo sin suelo tienen ventajas y desventajas, en específicos aquellos sistemas cerrados, Ikeda (2007) refiere que hay una recirculación de la solución nutritiva, reutilización de los sustratos y mejor aprovechamiento de los materiales sostenibles, aunque también requieren de una alta calidad del agua y fertilizantes, además que el pH y CE están en constante cambio, lo que implica un monitoreo y manejo adecuado de los parámetros, también existe el riesgo de una alta dispersión de patógenos en la solución nutritiva.

Kazaz *et al.* (2009) compararon un sistema de producción en suelo y sin suelo en el cultivo de clavel variedades “Turbo” y “Oasis” y encontraron que el cultivo producido en piedra pómez tuvo rendimientos mayores en un 22% y 19% en comparación con el cultivo en suelo, así como tallos más largos. Por otra parte, en el cultivo de arúgula, Nicola *et al.* (2005) obtuvieron rendimientos de hasta 75% más en un sistema sin suelo en comparación con el cultivo en suelo, así como una mayor precocidad en las hojas comercializables (70 días), es decir, en el cultivo en suelo se prolonga el periodo de crecimiento.

El uso de medios de cultivo sin suelo alternativos, además de observar cambios en los rendimientos, así como en variables vegetativas, reproductivas y de calidad del cultivo, también tiene otras ventajas como reducción de los costos de producción, tal como lo demuestran Albaho *et al.* (2013) en cultivo de pepino cultivar “Banan” en donde al usar diferentes relaciones porcentuales y materiales de sustratos se disminuyen los costos en los sistemas, así como hacer un uso eficiente del agua, pues cada sustrato tiene características propias.

Sustratos

El éxito en la producción de plantas de alta calidad en contenedores depende de las características tanto físicas como químicas del sustrato (Cabrera, 1999). Los sustratos tanto orgánicos como inorgánicos por sí solos no cumplen con las condiciones óptimas dependiendo del cultivo, por lo que, en ocasiones es necesario hacer mezclas con ambos tipos de sustratos para dar mejores condiciones de crecimiento a la planta (Morales y Casanova, 2015).

Los sustratos sólidos pueden ser fibrosos (orgánicos como turba, paja, fibra de coco e inorgánicos como lana de roca) y granulares (generalmente inorgánicos como por ejemplo la perlita, arena, piedra pómez, etc.) (Maucieri *et al.*, 2019).

Los granulares se caracterizan por una alta porosidad, baja retención de agua y gran parte del agua retenida no está fácilmente disponible para las plantas, su gradiente de humedad permite que las raíces se desarrollen principalmente en el fondo de los contenedores (Maucieri *et al.*, 2019).

Los sustratos orgánicos como la fibra de coco tienen una CE promedio de $1.49 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Gayosso-Rodríguez *et al.*, 2018) y cultivos sensibles a salinidad como el pimiento morrón que crece en condiciones ideales en una CE de $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Pérez-Vázquez *et al.*, 2020) impediría en cierta medida el uso de soluciones nutritivas, y sustrato inorgánicos como la perlita al ser química inertes y tener una CE casi nula (Maucieri *et al.*, 2019) sería idóneo para este tipo de cultivos, incluidos algunos vegetales asiáticos como el pak choi que crece bien en una CE de $1.5\text{-}2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Parks y Murray, 2011).

Perlita

La perlita es un sustrato inorgánico de origen volcánico de silicato de aluminio, con un 75% de SiO_2 y un 13% de Al_2O_3 ; físicamente es ligera y con alta porosidad libre que va del 30-60% vol., aún después de ser remojada, además de una porosidad total del 50-75% vol. Por otra parte, posee una densidad aparente de $90\text{-}130 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y su capacidad de retención de agua depende de las dimensiones de las aglomeraciones, pues el agua se retiene en la superficie y en los espacios entre dichas aglomeraciones por lo que su rango oscila entre 15-35% vol. Comercialmente se utilizan tamaños de partícula de 2-5 mm de diámetro. Químicamente, la perlita posee una CE de 0.02-0.04

mS cm⁻¹ y una capacidad de intercambio catiónico (CIC) casi nula que va de 1.5-3.5 meq, por tanto, no contiene nutrientes (Maucieri *et al.*, 2019), al ser químicamente inerte, por lo que su pH varía de 5.9 a 6.3 (Kang *et al.*, 2004) lo que le representa una capacidad tampón insignificante, por tanto, el pH del sustrato debe controlarse mediante la calidad del agua de riego (Maucieri *et al.*, 2019).

3.6 Solución nutritiva

Para Steiner (1961, 1984) la solución nutritiva es una relación mutua de cationes y aniones, así como la concentración iónica total y el pH. En tanto, los elementos esenciales que la planta requiere son suministrados vía sales fertilizantes al agua, las cuales no siempre no son las mismas pues deben ser seleccionadas en función de diferentes factores (Resh, 2006).

La concentración total de iones, es expresada como presión osmótica, la cual es una propiedad fisicoquímica dependiente de la cantidad de partículas o solutos disueltos. En tanto la relación entre aniones y cationes, es una regulación tanto en cantidad de elemento aportado como relación cuantitativa entre aniones y cationes por aparte. El pH determina la disponibilidad de los iones absorbidos por la planta, por lo que ni pH altos ni bajos son recomendables, puesto que se pueden formar precipitados, siendo un pH de 6.0-6.5 el óptimo pues existe equilibrio de iones y de formas absorbibles (Steiner, 1961, 1968).

El uso de la solución Steiner es universal, ha llevado años de experimentación y obtención de resultados, por ejemplo, en cultivos como lechugas y tomates, utilizando diferentes proporciones mutuas entre iones, y respondiendo favorablemente a varias combinaciones, para el caso de la lechuga a 0.48, 0.72, 1.08 y 1.62 atm. de presión osmótica y para el tomate a 0.18, 0.36, 0.72 y 1.08 atm. en varias estaciones del año, además de que las propias plantas tienen mecanismos para la selección de iones y haya proporciones entre aniones y cationes lo que favorezca el crecimiento y desarrollo de dichos cultivos (Steiner, 1980).

3.7 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es un indicador del contenido de sales, es decir, las concentraciones de iones cargados mientras mayores sean por unidad de volumen, mayor será dicha conductividad, permitiendo así el flujo de una corriente eléctrica, además de amortiguar más un cambio de pH (Combrink, 2013). La CE es un indicador de la fuerza total de la solución, no incluyendo el equilibrio entre nutrientes, y las unidades de medición son: $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ o $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, además se puede expresar como sólidos disueltos totales (TDS) (Parks y Murray, 2011).

La conductividad eléctrica de las soluciones nutritivas varía de acuerdo al cultivo, la etapa de crecimiento y las condiciones climáticas. En un sistema NFT, se cultivaron algunos vegetales de hoja asiática, como por ejemplo albahaca, choy sum, tatsoi y algunas variedades de pak choi, las cuales se manejaron a conductividades eléctricas entre 0.5 y 5.5 dS m^{-1} , con lo que se pudo observar que dichos vegetales tuvieron mejores crecimientos a rangos bajos de 1.5-2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, comparado con el repollo mostaza que presentó mejor crecimiento en CE altas que van de 2.5-3.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Parks y Murray, 2011).

La CE tiene efectos favorables o desfavorables dependiendo del nivel y del cultivo, en fresa se ha observado un aumento en el rendimiento de fruta cuando se utiliza CE de 2.5 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, (284 g planta⁻¹) en comparación con CE más bajas (1.5 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) con un rendimiento de 266 g. planta⁻¹, también se obtenido una reducción del 25% del rendimiento a CE altas (3.5 y 4.5 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) (D`Anna *et al.*, 2003). Carrasco (2007) demostró que, variando los valores de CE en el cultivo de albahaca, se presentan diferentes comportamientos de las plantas, por ejemplo, a CE bajas, existe mayor biomasa o materia en comparación con CE altas.

Además, existen otros cultivos que no son tolerantes a altos niveles de sales, por ejemplo, el pimiento morrón disminuye su rendimiento a CE superiores a 3 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, ya que es sensible a la salinidad, teniendo su mejor rendimiento a una CE de 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Pérez-Vázquez *et al.*, 2020).

3.8 Factores que influyen en la producción de los cultivos del género Brassica

3.8.1 Factores ambientales

Tanto el pak choi como el kale al ser hortalizas pertenecientes a la familia de las brassicáceas, se ven afectados en su calidad por factores ambientales y agronómicos (Neugart *et al.*, 2018), como se mencionarán algunos.

La luz beneficia el crecimiento de las plantas y aumenta su producción (Bian *et al.*, 2018), la intensidad y color de la luz tiene efectos sobre las plantas. En el cultivo de kale la luz azul influyó sobre la producción del cultivo al reducir la longitud de sus hojas a medida que la luz azul aumentó (Swan *et al.*, 2017).

En pak choi, Bian *et al.* (2018) evaluaron la producción en presencia de luz LED suplementaria, y encontraron que el peso fresco y seco y el área foliar aumentaron cuando la luz LED azul fue al 23% en comparación con la misma luz azul al 27% y 100% en conjunto con la luz roja, por otra parte la luz suplementaria en condiciones de invernadero, con una intensidad de luz de $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ aumenta la biomasa del pak choi, es decir, mejora los rendimientos y una luz de $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ayuda a una mejor calidad de compuestos tales como, fenoles, flavonoides, antocianinas y glucosinolatos (Zheng *et al.*, 2018).

Existen otros tipos de pak choi, como el rojo (*Brassica rapa var. Chinensis*, 'Rubi F1') que se ven influenciados por la adición de luz artificial proporcionada por LED, como mencionan Mickens *et al.* (2019) en donde una LED RB (rojo y azul) (relación $\approx 3: 1$) sobre pak choi rojo le confiere un mayor rendimiento (biomasa), área foliar y acumulación relativa de antocianinas.

3.8.2 Factores agronómicos

La cantidad de riego en los cultivos es un factor que va afectar su producción, conocer la cantidad adecuada permitirá el éxito de las cosechas, Barickman *et al.* (2020) al comparar dos volúmenes de agua (0.15 y $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^3$) observaron que el volumen mayor ($0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^3$) aumenta en un 22.5% el peso fresco del cultivo de kale, además de favorecer la concentración de algunos metabolitos como carotenoides y clorofilas y que con un riego deficitario ($0.15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^3$) disminuyen sus concentraciones.

Por otra parte, un estrés por sequía (40% de humedad) disminuye significativamente la biomasa en un 19 y 35% en comparación con una humedad control (80%) en el cultivo de kale, y también la concentración de K, P, Fe, Mn y Cu disminuyen en esa condición de estrés hídrico (humedad al 40%), no así Ca, Mg y Zn (Pathirana *et al.*, 2017).

La producción del kale también se ve influenciada por el sustrato donde se desarrolla, Abbey y Appah (2017) en un experimento con diferentes niveles de compost (estiércol) e inoculados con hongos micorrízicos, indican que la producción de hojas aumentó cuando se aplicó el 25% de compost y 75% de hongos micorrízicos, así como la altura de la planta y cuando se combinó 50% compost y 50% micorrizas se obtuvo mayor peso por planta.

Liu *et al.* (2003) trabajaron con pak choi (*Brassica campestris ssp. Chinensis(L.) Makino*), y vieron un efecto positivo en el rendimiento evaluando nutrición orgánica e inorgánica en dos épocas del año (invierno y primavera) y en ambas obtuvo mayor rendimiento en el cultivo tratado con nutrición orgánica.

El tiempo de cosecha y la densidad de plantas también influyen en el rendimiento de cultivos, Scuderi *et al.* (2013) observaron que a una mayor densidad de plantas (16 plantas·m²) el peso de la cabeza de la col china cultivar “Makono” disminuyó 48.5% en comparación con una densidad menor (9 plantas·m²), también una cosecha más retardada (60 días) aumenta el peso de la cabeza si se cosechara a 40 días.

Otro factor que influye en la producción de pak choi es el origen de la solución de nutrientes, Caralde y Salas (2015), probaron tres soluciones (mineral comercial, orgánica + sales inorgánicas y orgánica) y obtuvieron mayor peso por planta, mayor rendimiento y mayor tamaño de hoja en aquellas plantas del tratamiento con solución mineral comercial, mientras tanto la solución orgánica (hojas de *A. pintoi*, *G. sepium* y *Musa sp. Peel*) generó una mayor longitud de raíces, similar a la solución mineral comercial.

3.9 Relación nitratos-amonio en los cultivos

Los cultivos adquieren el nitrógeno en varias formas, dependiendo de las preferencias de cada especie por el tipo de fuente, dichas formas pueden ser nitratos, amonio o formas orgánicas (Uscola, 2014).

En cultivos de hoja los niveles altos de nitratos (NO_3^-) pueden ocasionar problemas a la salud, por tal motivo es de considerar el aporte de amonio (NH_4^+) como fuente de nitrógeno, para ello Lara-Izaguirre *et al.* (2019) evaluaron el crecimiento y acumulación de nitratos del cultivo de lechuga a diferentes relaciones de NO_3^- y NH_4^+ y encontraron que a una relación 65/35 y 50/50 hubo una reducción en la acumulación de NO_3^- en un 15%, el inconveniente es que disminuyó el tamaño en 25%, pero que está cerca de los niveles permitidos de nitratos en los cultivos por la norma europea, lo cual se podrían producir lechugas con niveles de nitratos permitidos pero con un tamaño menor, lo que influye en la producción.

En el cultivo de uchuva (*Physalis peruviana* L.) la aplicación de NH_4^+ al 50% en plantas vigorosas de dos años de edad favoreció el rendimiento, en tanto en las mismas plantas una aplicación del 25% de NH_4^+ hizo tallos más altos y gruesos, pero con un rendimiento menor en comparación con NH_4^+ al 50% (Antúñez-Ocampo *et al.*, 2014).

En el cultivo de tomate híbrido Charleston, se ha comprobado que una relación de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ (50/50) da como resultado una mayor altura de planta y mayor diámetro polar y ecuatorial de los frutos, no obstante, el mayor rendimiento del mismo se obtuvo con una relación de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ (75/25) así como tallos más gruesos de la planta (Rivera-Espejel *et al.*, 2014).

Relaciones de $\text{NO}_4^+/\text{NH}_3^-$ (100/0) pueden generar área foliar de cultivos como la albahaca similares e incluso mayores a una nutrición donde el aporte del nitrógeno sea sólo con nitratos, de acuerdo con González *et al.* (2009), en donde también la producción de biomasa total no se ve afectada por la adición de amonio en varias concentraciones, e incluso una relación de $\text{NO}_4^+/\text{NH}_3^-$ (40/60) puede generar mayor producción de biomasa.

En el cultivo de espinacas baby leaf, a una relación de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ 75/25 se obtuvo un mayor rendimiento ($4.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) y una mayor altura de planta (17.1 cm), que cuando la relación fue 100/0, 50/50 y 25/75, mientras tanto en el área foliar no hubo diferencias significativas entre estas cuatro

relaciones de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, además una relación 50/50 promovió más la producción de hojas (Conesa *et al.*, 2009).

En relación con la concentración nutrimental en cultivares de chile huacle (*Capsicum annuum* L.) no existen diferencias de los nutrimentos N, P, K y Ca con la adición de diferentes concentraciones de NH_4^+ (0, 1.5 y 3.0 $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$) en una solución nutritiva de Steiner, es decir el contenido nutrimental no se ve afectado por el amonio, contrario a la concentración de Mg, que disminuye al aumentar el NH_4^+ (Urbina-Sánchez *et al.*, 2020), también la simple adición de NH_4^+ en la solución nutritiva favorece el crecimiento y rendimiento de los cultivos, pero en exceso causa toxicidad.

3.10 Nitratos

Los nitratos son una forma natural de nitrógeno que se puede encontrar en el aire, agua, suelos y en alimentos y debido a un uso excesivo de fertilizantes sintéticos y estiércoles de ganado en la agricultura intensiva, hoy en día tanto los alimentos, en especial, las verduras como el agua potable pueden contener niveles altos de nitratos perjudiciales para la salud humana (Santamaría, 2005) y el medio ambiente. El consumo de verduras de hoja es favorable debido a las vitaminas, minerales y fitoquímicos benéficos para la salud humana (Ortega-Blu *et al.*, 2020), pero al mismo tiempo pueden ser dañinas debido a su potencial carcinogénico y tóxico en altos niveles (Brkić *et al.*, 2017).

Se han detectado muchas condiciones que influyen en el contenido de nitrato en los cultivos, en especial en vegetales de hoja, que su consumo es directo. El periodo del año, influye en el contenido de nitratos en un mismo vegetal. Brkić *et al.* (2017) en un estudio en Croacia encontraron en col rizada un contenido promedio de 603 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de nitratos en primavera y casi el doble (1181.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en otoño, en otros cultivos como lechugas, espinacas y acelgas, se encontró el mismo comportamiento, con contenidos de hasta 2031.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en lechugas en otoño. Por otra parte, Lucarini *et al.* (2011) hallaron que los sistemas de cultivo influyen en la acumulación de nitratos en lechuga romana, en un sistema biodinámico la acumulación de nitratos en sus hojas fue de 1.3-2 veces menor que en aquellas plantas cultivadas orgánicamente con contenidos de 408 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en sistemas biodinámicos y 679 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en sistemas orgánicos. En lechugas se ha

encontrado una relación directa entre una aplicación excesiva de nitrógeno, ya sea en fertilizantes orgánicos como inorgánicos con mayores niveles de nitratos en los tejidos vegetales (Ortega-Blu *et al.*, 2020), otro estudio prueba el efecto de fertilizantes nitrogenados, ya sean orgánicos, inorgánicos o líquidos, y demuestran que a medida que aumenta la dosis de fertilizante nitrogenado inorgánico (NH_4NO_3) al doble (de 200 a 400 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$) aumenta la concentración de nitratos de 5000 a 6100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Liu *et al.*, 2014).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de investigación está conformado de dos experimentos. En el primero se analizó el efecto de la CE de la solución nutritiva Steiner (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) en el desarrollo, producción y concentración nutrimental de plantas de pak choi (*Brassica rapa subespecie Chinensis* L.) y kale (*Brassica oleracea var. acephala*). En el segundo experimento se planeó a partir de la CE que tuvo mejores efectos sobre las plantas en el primer experimento, para posteriormente evaluar la relación nitrato y amonio a partir de la solución nutritiva Steiner ($\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, 75/25, 50/50 y 25/75) y cuantificar el desarrollo y concentración nutrimental de plantas de pak choi y kale.

Por último, se realizó la cinética de crecimiento de hojas en los cultivos de pak choi y kale, comenzando por evaluar el efecto de los cuatro niveles de conductividad eléctrica (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) en el primer experimento y por último la relación de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ (75/25, 50/50 y 25/75) en el segundo experimento.

4.1. Experimento 1. Conductividad eléctrica de la solución nutritiva Steiner en el desarrollo, producción y concentración nutrimental de plantas de pak choi y kale

4.1.1. Ubicación de la investigación y condiciones experimentales

La investigación se realizó bajo condiciones de invernadero, el cual era de tipo túnel con cortinas laterales, estructura de acero galvanizada y cubierta de polietileno, del Área de Nutrición Vegetal del postgrado de Edafología en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, a una altitud de 2,250 m, y con coordenadas geográficas de 19. 52° Latitud Norte y 98 88° Longitud Oeste.

Las temperaturas registradas durante el experimento se muestran en la Figura 1, con temperatura mínima promedio de 7.8 °C y máxima de 37 °C y humedad relativa máxima promedio de 90%.

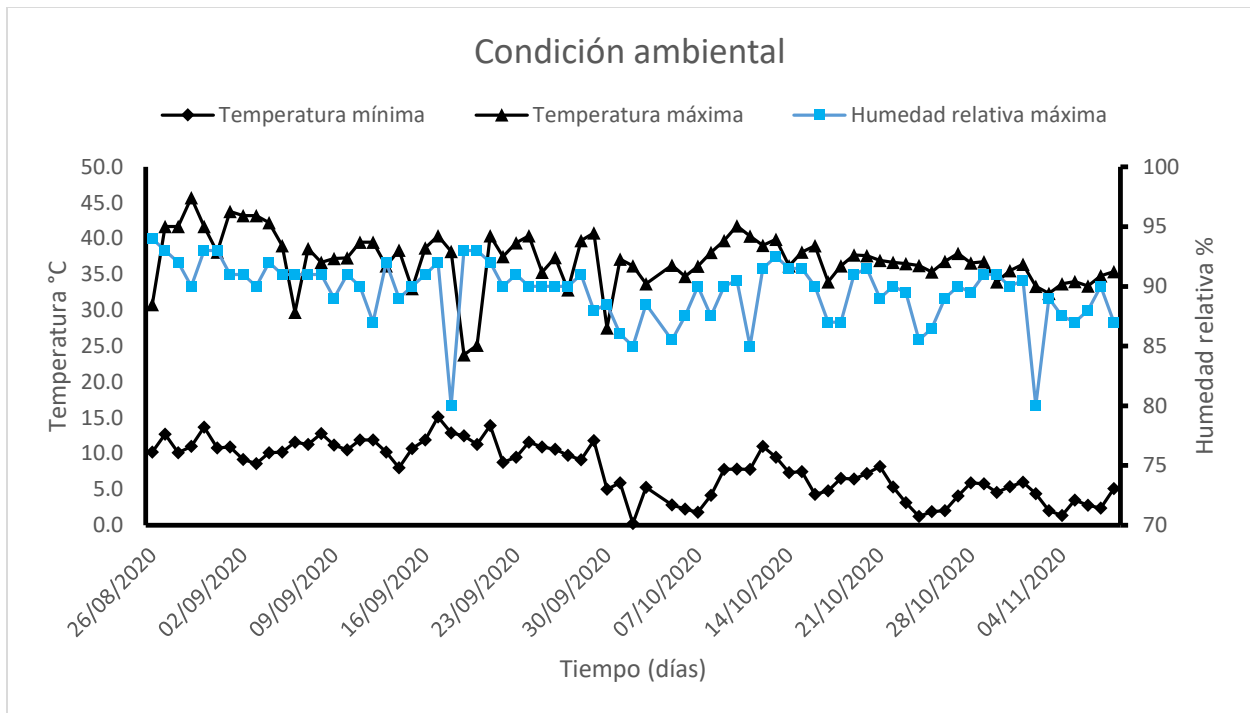


Figura 1. Temperatura mínima y máxima y humedad relativa máxima en el lapso de producción de almácigos hasta cosecha registradas en invernadero en el primer experimento (26 de agosto a 9 de noviembre de 2020).

4.1.2. Material vegetal

Los materiales vegetales utilizados fueron semillas de pak choi (*Brassica rapa subespecie Chinensis L.*) variedad Cantón y semillas de kale (*Brassica oleracea var. acephala*) variedad “Dwarf Blue Curled Scotch”.

4.1.3. Análisis de agua

El agua del invernadero donde se llevó a cabo el experimento se envió al laboratorio FERTILAB, en Celaya, Guanajuato, para análisis químico y los resultados se muestra en la Cuadro 4. A partir de ello se hicieron los cálculos de las soluciones nutritivas a diferentes conductividades eléctricas.

Cuadro 4. Análisis químico de agua de pozo del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México del mes de septiembre de 2020.

Determinación	Abreviatura	Resultado
Conductividad eléctrica	CE	0.48 dS·m ⁻¹
pH	pH	7.89
Relación de adsorción de sodio	RAS	1.15
Calcio	Ca	1.26 meq·L ⁻¹
Magnesio	Mg	2.06 meq·L ⁻¹
Sodio	Na	1.48 meq·L ⁻¹
Potasio	K	0.25 meq·L ⁻¹
Sulfatos	S-SO ₄	0.84 meq·L ⁻¹
Bicarbonatos	HCO ₃	2.94 meq·L ⁻¹
Cloruros	Cl	0.74 meq·L ⁻¹
Carbonatos	CO ₃	0.00 meq·L ⁻¹
Nitratos	N-NO ₃	3.22 mg·L ⁻¹
Boro	B	0.0000 mg·L ⁻¹
Hierro	Fe	0.0140 mg·L ⁻¹
Manganeso	Mn	0.0007 mg·L ⁻¹
Cobre	Cu	0.0018 mg·L ⁻¹
Zinc	Zn	0.0010 mg·L ⁻¹
Arsénico	As	0.0180 mg·L ⁻¹
Amonio	N-NH ₄	2.37 mg·L ⁻¹
Fosfatos	P-PO ₄	0.03 meq·L ⁻¹

4.1.4. Diseño de tratamientos

Los tratamientos establecidos fueron cuatro que correspondieron a niveles de CE de la solución nutritiva Steiner: 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 dS·m⁻¹.

4.1.5. Diseño experimental

Una vez que las plántulas de ambos cultivos en los almácigos tuvieron dos pares de hojas verdaderas, se hizo el trasplante y quedaron distribuidas en dos unidades experimentales, una para el pak choi y otra para el kale, con un diseño experimental completamente al azar (DECA) en ambos casos. Se establecieron cuatro tratamientos por unidad experimental (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE de la Solución Steiner) con un total de 10 repeticiones por tratamiento, obteniendo así un total de 40 plantas a evaluar por cultivo, distribuidas como se muestran en las Figuras 2 y 3, quedando espaciadas dentro del invernadero como se aprecia en la Figura 4.

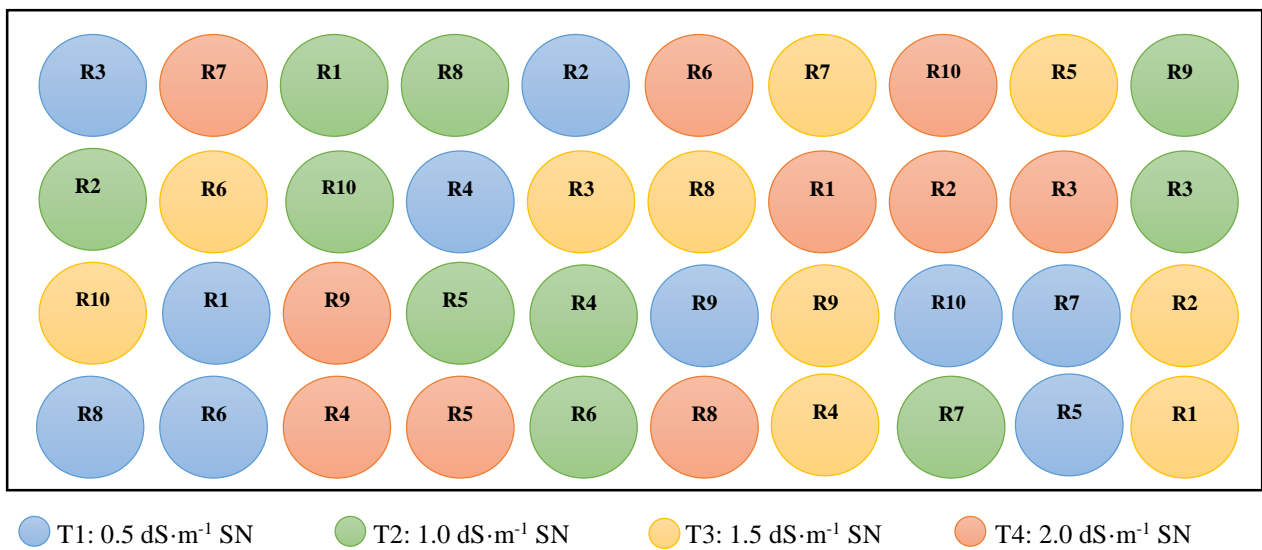


Figura 2. Diseño experimental completamente al azar del cultivo de pak choi con cuatro tratamientos y 10 repeticiones.

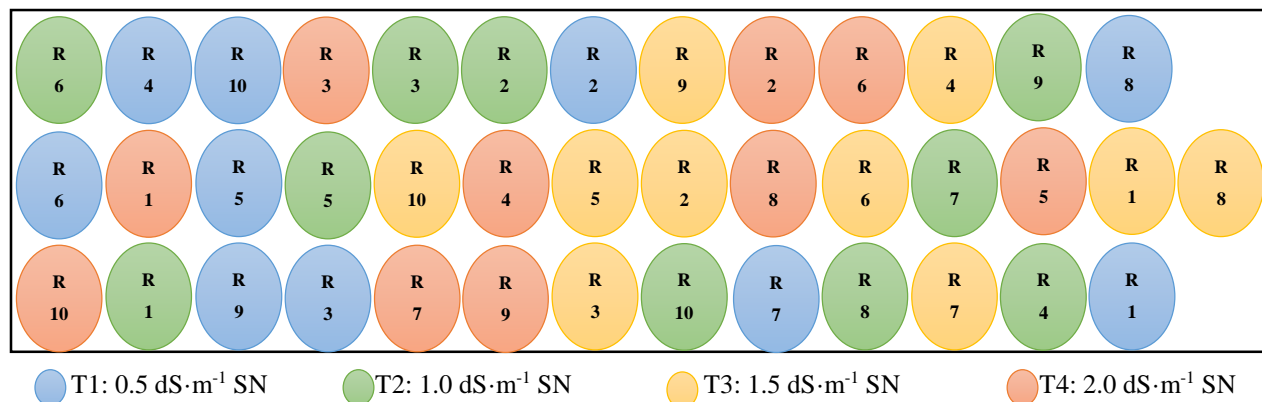


Figura 3. Diseño experimental completamente al azar del cultivo de kale con cuatro tratamientos y 10 repeticiones.

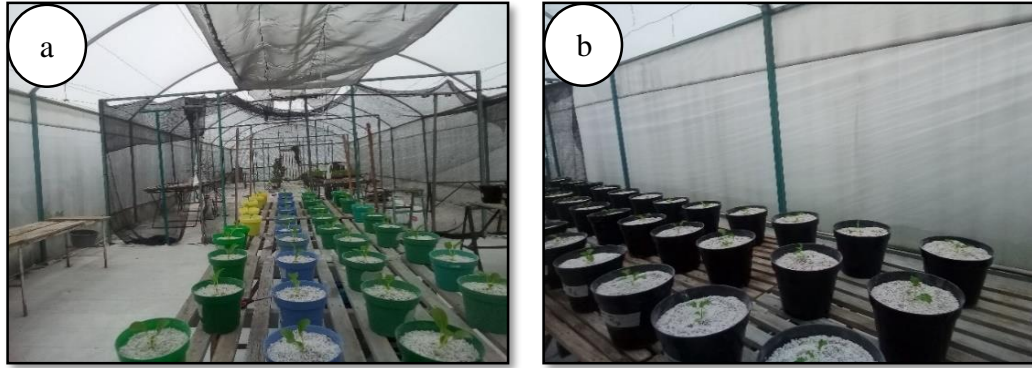


Figura 4. Distribución de los tratamientos en las unidades experimentales: a) cultivo de pak choi, b) cultivo de kale en condiciones de invernadero.

4.1.6. Manejo del cultivo

Producción de almácigo

La producción de almácigos se estableció el 24 de agosto de 2020 en semilleros termoformado de 50 cavidades de poliestireno con turba como sustrato a capacidad de campo, depositando 3 semillas de pak choi (*Brassica rapa subespecie chinensis* L.) y kale (*Brassica oleracea var. acephala*) por cavidad para un mayor porcentaje de germinación y emergencia, posterior a la siembra, se cubrieron con cartón para mantener los almácigos en oscuridad y conservar la humedad hasta la emergencia.

La emergencia de las plántulas tanto de pak choi como de kale se dio entre los días 3 y 8 con un porcentaje de germinación del 97.3% y el 94% respectivamente (Figura 5).



Figura 5. Almácigos de pak choi y kale a 11 días después de la siembra, con un alto porcentaje de germinación y emergencia (97.3% y 94% respectivamente).

Los riegos con agua se dieron durante los primeros 8 días, para posteriormente realizarlos con solución nutritiva Steiner al 10% hasta el día 12 y a partir de ese día hasta el trasplante (23 días después de la siembra) con solución Steiner al 25%. Los riegos se dieron por la mañana y por la tarde, procurando la capacidad de campo del sustrato en todo momento.

Trasplante

El trasplante de los cultivos se hizo a los 23 días de iniciados los almácigos (16 de septiembre de 2020); con dos pares de hojas verdaderas en ambos cultivos, utilizando sustrato de perlita a capacidad de campo al momento del trasplante y macetas de 2 L para el pak choi y de 6 L para el kale, colocando en la parte superior de las macetas tezontle para evitar que en la perlita proliferaran algas (Figura 6).



Figura 6. Trasplante de los cultivos en sustrato de perlita: a) Vista panorámica de los bancales, b) plántulas de pak choi con dos pares de hojas verdaderas, c) plántulas de kale con dos pares de hojas verdaderas.

Riegos

Los primeros tres días, los cultivos se regaron con una solución Steiner a una CE de $0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (25%) con la finalidad de adaptar las plantas al sustrato, posterior a ese tiempo se iniciaron los tratamientos (solución Steiner a 0.5, 1.0, 1.5 y $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) ajustando el pH entre 5.8 y 6.0 una vez por semana.

El riego se hizo de manera manual, utilizando recipientes graduados, se inició con volúmenes bajos, y conforme fueron creciendo los cultivos iba aumentando la cantidad de solución nutritiva en

las macetas, como se indica en el Cuadro 5, en donde se presenta el incremento en volumen de los riegos a lo largo del ciclo de los cultivos o al menos hasta el momento de la cosecha.

A pesar de que las necesidades hídricas por parte de las plantas de los cuatro tratamientos fueron diferentes, se dieron los riegos con el mismo volumen para que no existiera una diferencia en el crecimiento de las plantas por acción del volumen de la solución.

Cuadro 5. Volumen de solución nutritiva incorporado a las macetas a través del ciclo de cultivo del pak choi y kale producidos en perlita, bajo invernadero.

Días después del trasplante	Volumen promedio (mL) por maceta	
	Pak choi	Kale
0-18	50.0	80.0
19-26	95.0	100.0
27-36	260.0	200.0
37-40	350.0	240.0
41-47	440.0	320.0
48-54	-	450.0

Solución nutritiva

La solución nutritiva que se aplicó fue la solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas. Para N, P, K, Ca, Mg y S las sales utilizadas fueron grado reactivo y para el caso de los micronutrientes se utilizó la mezcla química de micronutrientes quelatados con EDTA de Tradecorp AZ[®] a la solución nutritiva a una dosis de a 4 g·100 L a los cuatro tratamientos, dicha solución se preparó con agua de la llave (análisis químico previamente), a la cual se ajustó el pH con ácido sulfúrico en un rango de 5.5-6.5 y medido con un potenciómetro. Los cálculos para la solución final se hicieron mediante la diferencia de la solución Steiner menos lo que aportó el agua, haciendo un ajuste de los meq de cada fertilizante.

El Cuadro 6 muestra la solución Steiner, las fuentes utilizadas y los meq de las sales empleadas para preparar 1 L de solución con las CE indicadas para los tratamientos. La CE de 0.2 dS·m⁻¹ se utilizó como al 10% para los primeros días de la producción de almácigos, y las otras CE se utilizaron como los tratamientos de la investigación.

Cuadro 6. Mili equivalentes por litro de las fuentes de fertilizantes de macronutrientes para la preparación de 1 L de la solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas.

Fuente	Conductividad eléctrica (dS·m ⁻¹)				
	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	0.77	1.94	3.87	5.81	7.74
KNO ₃	0.40	1.01	2.02	3.02	4.03
K ₂ SO ₄	0.18	0.44	0.88	1.31	1.75
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.19	0.49	0.97	1.46	1.94
KH ₂ PO ₄	0.10	0.24	0.49	0.73	0.97

Control fitosanitario

Dentro del manejo de los cultivos, se hizo uso de alternativas orgánicas para el control y combate de plagas y enfermedades, y el uso de productos orgánicos, así como la formulación de dichos productos (Cuadro 7). En el Cuadro 8 se muestra los productos utilizados y las veces que fue necesario aplicarlos durante el ciclo de cultivo.

Cuadro 7. Formulación de los productos utilizados en la producción de pak choi y kale.

Producto	Formulación	Función
Aceite blanco	500 ml de aceite + 250 ml de jabón potásico	Combate <i>vs</i> mosquita blanca
Caldo sulfocálcico	10 kg de cal + 20 kg de azufre + 100 L de agua en ebullición	Repelente contra plagas y enfermedades, al tener propiedades fungicidas e insecticidas, además de aportes nutricionales
Caldo bordelés	10 g de sulfato de cobre + 10 g de cal agrícola + 1 L de agua. Se lleva a 5% en 1 L de agua	Combate enfermedades fúngicas

Cuadro 8. Productos aplicados al pak choi y kale producidos en perlita bajo invernadero.

Producto	Combate	Aplicación	Dosis	Fecha aplicación
Aceite blanco	Mosquita blanca	Foliar	al 2.0%	17 de septiembre de 2020
Caldo sulfocálcico	Mildiu	Foliar	al 0.2%	22 de septiembre de 2020
Caldo bordelés	Mildiu	Foliar	al 5%	29 de septiembre de 2020
Caldo bordelés	Mildiu	Foliar	al 5%	5 de octubre de 2020
Jabón + Aceite	Mosquita blanca	Foliar	al 2.0%	8 de octubre de 2020
Aceite blanco	Mosquita blanca	Foliar	al 2.0%	13 de octubre de 2020
Aceite blanco	Mosquita blanca	Foliar	al 2.0%	23 de octubre de 2020

Cosecha

La cosecha del pak choi se realizó a los 47 días después del trasplante (ddt), una vez que los tratamientos alcanzaron un tamaño comercial, esto al menos con las plantas que eran regadas con SN con $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, puesto que las plantas que fueron regadas con menor CE (0.5 y $1.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) de SN tuvieron un tamaño menor. El kale se cosechó a los 54 ddt, cortando la planta entera y

seleccionando aquellas hojas mayores a 10 cm, para hacer determinaciones explicadas en el siguiente apartado. La Figura 7 muestra las plantas al momento de la cosecha.



Figura 7. Cultivos a la cosecha desarrollados con soluciones nutritivas a diferente CE, a) plantas de pak choi a los 47 ddt; b) plantas de kale a los 54 ddt.

4.1.7. Variables evaluadas

4.1.7.1. Variables de desarrollo

En ambos cultivos se hizo la determinación de las mismas variables. En pak choi se midió el área foliar y en kale se midió la longitud y el ancho de las hojas exclusivamente en hojas comerciales, así como su peso en fresco y número de hojas. En la Figura 8 se muestran las evaluaciones a las variables citadas a continuación.

Peso fresco

Se hizo la separación de la parte aérea de la raíz, para posteriormente determinar su peso en fresco al momento del corte en una báscula de precisión marca NOVAL[®] TH-I-EK con capacidad de 5000g x 1g. Los valores obtenidos se reportaron en g (Figura 8a).

Diámetro de tallo

Se midió el diámetro del tallo al momento de la cosecha a la altura del corte donde se separó la parte aérea y la raíz con la ayuda de un vernier digital marca TRUPER[®] modelo CALDI-6MP. Los valores obtenidos se reportaron en mm (Figura 8b).

Resistencia a la penetración

Posterior al corte de la parte aérea, se tomó la planta como se muestra en la Figura 8c y con un penetrómetro análogo marca QA Supplies[®] modelo FT327 se midió la resistencia que oponía el tallo de las hojas. Los valores obtenidos se reportaron en kg.

Número de hojas

Se hizo la contabilidad de las hojas por planta, desde la más pequeña hasta la más grande, excluyendo aquellas que estaban con una tonalidad amarillenta en gran parte de la hoja o casi marchitas (Figura 8d).

Volumen y longitud radical

Para la determinación de ambas variables se prosiguió a lavar muy bien la raíz, retirando todo material (perlita, tezontle, cepellón) con agua y dejando secar por un momento. Posteriormente para la medición del volumen (Figura 8e) se hizo con una probeta de plástico de 1 L mediante el desplazamiento del agua, el cual fue proporcional al volumen de la raíz y para la medición de la

longitud (Figura 8f) se hizo con una regla metálica de 1 m. Los valores obtenidos se reportaron en cm^3 (volumen) y cm (longitud).

Área foliar en pak choi

Las hojas de cada planta fueron separadas del tallo al momento de la cosecha y puestas en papel periódico aplanadas por 3 días para posteriormente determinar su área en un integrador medidor de área, modelo LI-3100C de LICOR en el laboratorio de Nutrición Vegetal del mismo campus. Los valores obtenidos se reportaron en cm^2 (Figura 8g).

Longitud, ancho, peso fresco y número de hojas comerciales en kale

Las hojas que median más de 10 cm se consideraron hojas comerciales, las cuales se les midió su longitud (Figura 8i) y ancho con una regla metálica de 1m, se contabilizaron las hojas mayores a 10 cm y se pesaron (Figura 8j) en una báscula de precisión marca NOVAL[®] TH-I-EK con capacidad de 5000 g x 1 g. Los valores obtenidos se reportaron en cm (longitud y ancho de hoja) y g (peso fresco de hojas comerciales).

Peso seco de tallo, hoja y raíz

En una estufa de aire forzado modelo HCF-125D de la marca Riossa[®] a 70 °C se secaron el tallo, la hoja y la raíz por separado por 72 horas, para posteriormente pesar el material seco en una balanza analítica digital de la marca ADAM[®], modelo PW254 con capacidad máxima de 250 g y una resolución de 0.0001g. Los valores obtenidos se reportaron en g (Figura 8h).

Lecturas SPAD

Las lecturas SPAD se tomaron a los 40 ddt, utilizando un SPAD 502 marca Minolta en hojas recientemente maduras, realizando 3 lecturas por planta para obtener un promedio. Los valores obtenidos se reportaron como lecturas SPAD (Figura 8l).

Ca²⁺ y K⁺ en extracto celular de peciolo (ECP)

La concentración de los iones en el peciolo de hojas recientemente maduras se determinó mediante medidores Laquatwin ionómetros de calcio y potasio de la marca Horiba®. Se obtuvo un extracto del peciolo y mediante el sensor del ionómetro se obtuvo la concentración del elemento. Los valores obtenidos se reportaron en mg L⁻¹ (Figura 8k).



Figura 8. Determinación de las variables agronómicas al momento de la cosecha de pak choi y kale: a) Peso fresco de pak choi, b) Diámetro de tallo de pak choi, c) Resistencia a la penetración en pak choi, d) Número de hojas de pak choi, e) Volumen de la raíz de pak choi, f) Longitud de la raíz de pak choi, g) Área foliar de pak choi, h) Peso seco de hoja de pak choi, i) Longitud de hojas comerciales de kale, j) Peso y número de hojas comerciales de kale, k) Ca y K en ECP en kale y l) Lecturas SPAD en kale.

4.1.7.2. Variable de producción

Para calcular la variable de producción, se hizo mediante el conteo del número de plantas por la superficie ocupada y extrapolando a una hectárea, posteriormente se multiplicó el peso promedio de las plantas de cada tratamiento por el número plantas por unidad de superficie.

4.1.7.3. Variables nutrimentales

Nitrógeno total

Este elemento se determinó mediante el método Kjeldahl, para lo cual se pesó 0.1 g de la muestra molida y seca y se añadió 3 mL de la mezcla de ácidos sulfúrico-salicílico, dejándose pre digerar por una noche, posteriormente se añadió una mezcla catalizadora de sulfatos y se digestaron las muestras en una parrilla de calentamiento de arena a una temperatura de 350 °C dentro de en una campana extractora Hamilton®, modelo Safeaire y hasta que la solución tomó un color verde agua. Se prosiguió a la destilación utilizando NaOH al 50%, ácido bórico al 4% e indicador verde bromocresol-rojo de metilo, para finalizar con la titulación con ácido sulfúrico 0.05 N a un vire rosado.

Nitratos

Los nitratos se determinaron mediante el método de Cataldo, pesando 0.1 g de muestra seca a 70 °C, y añadiendo 10 mL de agua desionizada para posteriormente calentar la solución a 40 °C en baño maría por 1 h y centrifugar por 15 minutos a 5000 rpm; para el desarrollo del color, a una alícuota de 0.2 mL de la solución se le añadieron 0.8 mL de ácido salicílico-sulfúrico y 19 mL de NaOH, la lectura se hizo en un espectrofotómetro marca SPECTRONIC®, modelo 20 a 410 nm, haciendo uso de una curva de calibración (Figura 9) con una solución patrón de 500 ppm de N-NO_3^- (KNO_3), la cual igual se tomaron alícuotas de 0.2 de cada solución de los puntos de la curva y se añadieron los mismos reactivos de las muestras vegetales.

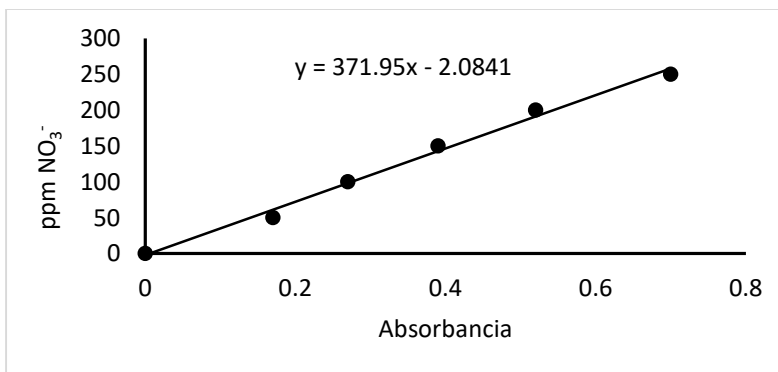


Figura 9. Curva de calibración de nitratos para el método de Cataldo.

Macronutrientes (Ca, K, Mg, P y S) y Micronutrientes (Fe, Zn, Cu, Mn, B, Mo y Ni)

Esta determinación se realizó mediante una digestión húmeda en muestras molidas y secas, en las cuales se pesaron 0.5 g de material vegetal y se adicionaron 5 mL de la mezcla de ácido nítrico-perclórico dejando pre digestar por una noche y posteriormente digestar las muestras en una plancha de arena en una campana extractora Hamilton[®], modelo Safeaire a una temperatura de 190 °C hasta que la solución presentó un color claro. Una vez que las muestras se digestaron por completo se añadió 25 mL de agua desionizada, se filtró por papel Whatman No. 40 y se prosiguió a analizar los elementos en un equipo de espectrometría de emisión e inducción por plasma de la marca VARIAN[®], modelo ICP-OES 725-ES.

4.1.8. Análisis de datos

Los datos obtenidos en cada variable se sometieron a pruebas de Shapiro-Wilk ($\alpha=0.05$) para comprobar un comportamiento de acuerdo con la distribución normal. Las variables que cumplieron con dicha prueba fueron sometidas a análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de significancia ($\alpha = 0.05$). También se comprobaron los supuestos de homogeneidad de varianza de Bartlett, normalidad de los residuos de Shapiro-Wilk y la prueba de independencia de datos. Después, se procedió a hacer la prueba de comparación de medias a través de la diferencia significativa honesta de Tukey (DSH) con un nivel de significancia ($\alpha = 0.05$).

Las variables que no cumplieron con la prueba de normalidad fueron convertidas a logaritmos naturales y después sometidas de nuevo a la prueba de Shapiro-Wilk ($\alpha=0.05$). Si cumplía con la normalidad se hacía el ANDEVA comprobando todos sus supuestos y se procedía con la comparación de medias a través de la diferencia significativa honesta de Tukey (DSH). Si no cumplían (por segunda vez) fueron analizadas a través de procedimientos no paramétricos de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$).

Los cálculos se apoyaron de los paquetes estadísticos Statistical Analysis System (SAS) versión 9.0 para Windows y R versión 4.0.2 para Windows.

4.2. Experimento 2. Relación nitrato-amonio de la solución nutritiva Steiner en el desarrollo, producción y concentración nutrimental de plantas de pak choi y kale

4.2.1. Ubicación de la investigación y condiciones experimentales

La segunda parte de la investigación se realizó bajo condiciones de invernadero, mismo que el de la primera parte del experimento ubicado en campus Montecillo.

Las temperaturas registradas durante el experimento se muestran en la Figura 10, teniendo una temperatura mínima promedio de 4.2 °C y una máxima de 37.3 °C y una humedad relativa máxima promedio de 79%.

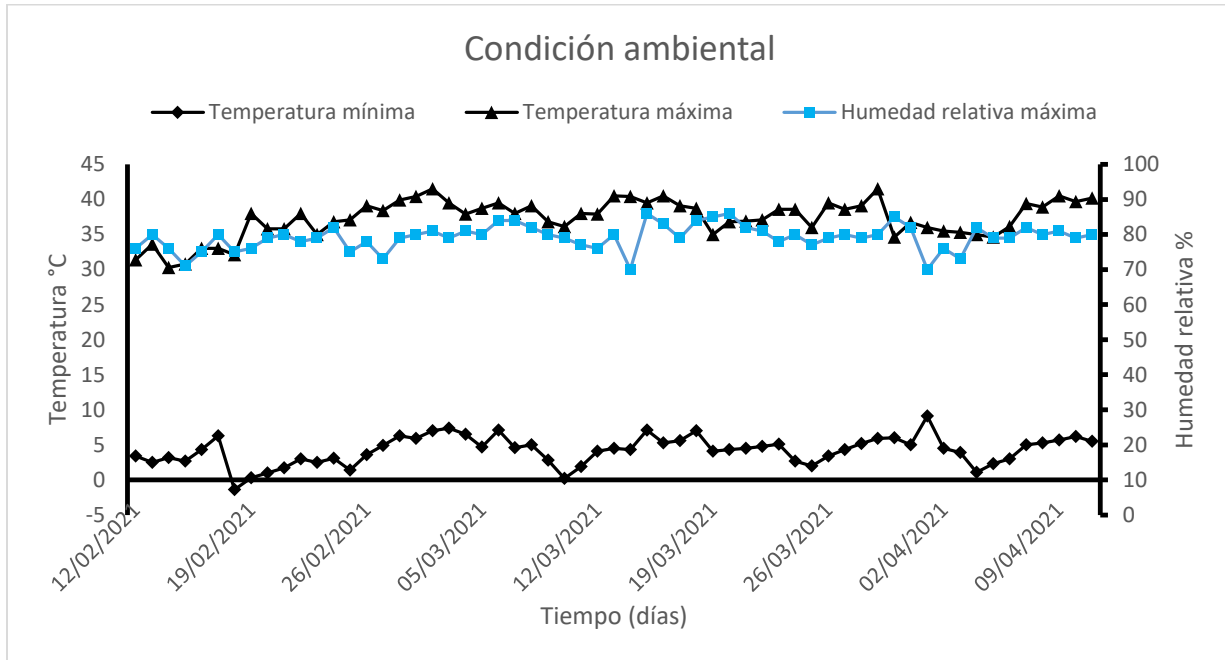


Figura 10. Temperatura mínima y máxima y humedad relativa máxima en el lapso de producción de almácigos hasta cosecha registradas en invernadero en el segundo experimento (12 de febrero al 12 de abril de 2021).

4.2.2. Material vegetal

Los materiales vegetales utilizados fueron los mismos del experimento 1, semillas de pak choi variedad Cantón y semillas de kale cv "Dwarf Blue Curled Scotch".

4.2.3. Análisis de agua

El agua utilizada fue la misma del experimento uno, por tanto, los cálculos de las soluciones nutritivas se hicieron a partir del mismo análisis químico.

4.2.4. Diseño de tratamientos

Los tratamientos establecidos fueron tres que correspondieron a diferentes relaciones de nitrato/amonio de la solución nutritiva Steiner tomando como referencia una CE de $1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, estos tratamientos son las relaciones amonio/nitrato: 75/25, 50/50 y 25/75, valores en porcentaje.

4.2.5. Diseño experimental

Las plántulas al tener dos pares de hojas verdaderas se trasplantaron y quedaron distribuidas en dos unidades experimentales, una para el pak choi y otra para el kale, con un diseño experimental completamente al azar (DECA) en ambos casos. Se establecieron tres tratamientos por unidad experimental (75/25, 50/50 y 25/75 de relación de nitrato/amonio de la Solución Steiner) con un total de 14 repeticiones por tratamiento, obteniendo así un total de 42 plantas a evaluar por cultivo, distribuidas como se muestran en las Figuras 11 y 12.

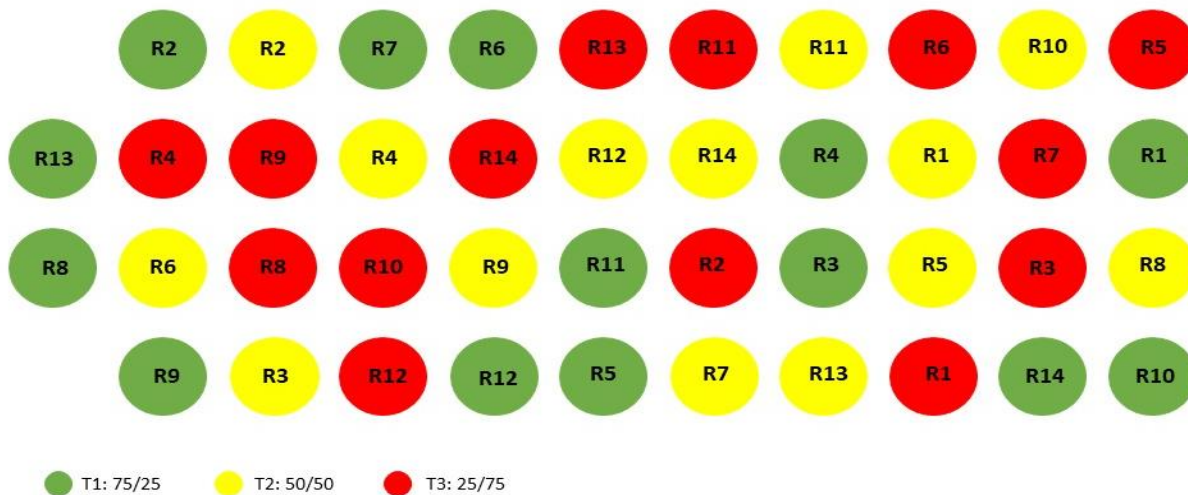


Figura 11. Diseño experimental completamente al azar del cultivo de pak choi con tres tratamientos y 14 repeticiones.

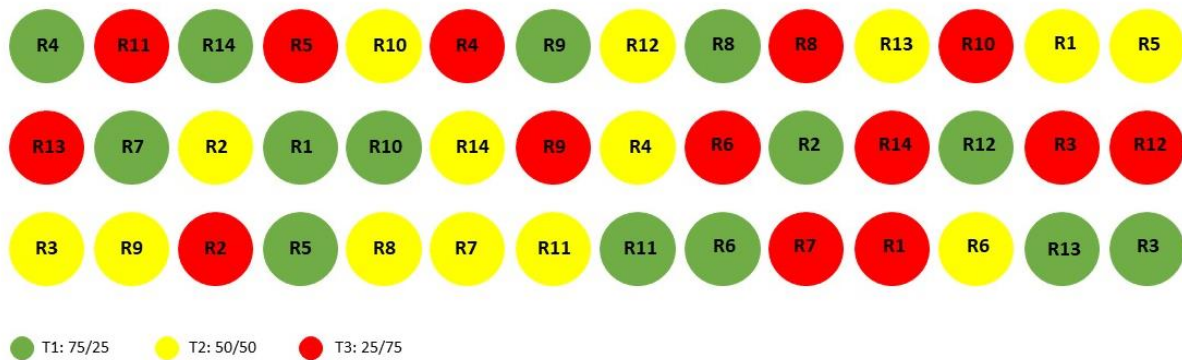


Figura 12. Diseño experimental completamente al azar del cultivo de kale con tres tratamientos y 14 repeticiones.

4.2.6. Manejo del cultivo

Producción de almácigo

La producción de almácigos se estableció el 14 de enero de 2021 en charolas germinadoras de unícel de 200 cavidades con turba como sustrato a capacidad de campo, depositando 3 semillas de pak choi (*Brassica rapa subespecie chinensis L.*) y kale (*Brassica oleracea var. acephala*) por cavidad para un mayor porcentaje de germinación y emergencia, cubriendo con cartón posterior a la siembra para mantener en obscuridad y humedad las charolas. Por motivos de la pandemia de COVID 19, la producción se llevó a cabo en un vivero rústico de Santiago Chazumba, Oaxaca.

La emergencia se dio entre los días 4 y 6 con un porcentaje de germinación del 95% para el pak choi y el 93% para el kale.

Los riegos se dieron con solo agua durante los primeros 10 días, para posteriormente regar con fertilizante triple 17 hasta el momento del trasplante (29 días después de la siembra), los riegos se dieron de 2 a 3 veces al día, procurando la capacidad de campo del sustrato la mayor parte del tiempo.

Trasplante

El trasplante se hizo a los 29 días de iniciados los almácigos (12 de febrero de 2021), ya en el invernadero del Colegio de Postgraduados campus Montecillo. Los cultivos tenían dos pares de hojas verdaderas, se utilizó sustrato de perlita a capacidad de campo al momento del trasplante y macetas de 2 L para el pak choi y de 6 L para el kale, se colocó tezontle en las macetas que evitara proliferación de algas.

Riegos

Los riegos se dieron con una solución Steiner de $0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE durante los primeros 5 días después del trasplante, la finalidad era adaptar las plantas al sistema y que todas comenzaran igual, ya que fueron traídas de otro Estado. A los 6 ddt se iniciaron los tratamientos (relación nitrato/amonio de 75/25, 50/50 y 25/75 de la solución Steiner) ajustando pH a 5.8-6.0 y con una CE de 2.16, 2.4 y $2.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ respectivamente.

Como en el experimento uno, en esta segunda parte el riego fue de manera manual, iniciando con volúmenes bajos y conforme crecieron los cultivos se aumentó el volumen de la solución nutritiva en las macetas, tal como se aprecia en Cuadro 9.

Cuadro 9. Volumen de solución nutritiva incorporado a las macetas a través del ciclo de cultivo del pak choi y kale producidos en sustrato de perlita, bajo invernadero en el segundo experimento.

Días después del trasplante	Volumen promedio (mL) por maceta	
	Pak choi	Kale
1-6	100	150
7-20	150	175
21-33	300	300
34-40	400	400
41-52	650	560
53-59	-	750

Solución nutritiva

La solución nutritiva que se aplicó fue la solución Steiner modificada, variando la relación nitrato/amonio en diferentes porcentajes (75/25, 50/50 y 25/75) y tomando como referencia una solución Steiner al 75% ($1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$). Para N, P, K, Ca, Mg y S las sales utilizadas fueron grado reactivo y para el caso de los micronutrientes se utilizó la mezcla química de micronutrientes quelatados con EDTA de Tradecorp AZ[®] suministrando $4 \text{ g}\cdot 100 \text{ L}$ a la solución nutritiva a los tres tratamientos, así como en el experimento 1, se usó la misma agua de la llave y se ajustó el pH con ácido sulfúrico en un rango de 5.8-6.0 con potenciómetro.

El Cuadro 10 muestra la solución Steiner modificada, se agrega amonio en cierta proporción como fuente de nitrógeno en conjunto con nitratos, las fuentes utilizadas y la cantidad de las sales empleadas para preparar 1 L de solución de acuerdo a los tratamientos.

Cuadro 10. Fuentes de fertilizantes de macronutrientes para la preparación de 1 L de la solución Steiner a diferentes relaciones nitrato/amonio.

Fuente	$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$		
	75/25	50/50	25/75
	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	647.82	503.86	238.36
K_2SO_4	372.36	372.36	372.36
$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	115.62	115.62	115.62
KH_2PO_4	97.92	97.92	97.92
CaSO_4	-	104.92	298.42
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	65.4	262.2	397.2
NH_4NO_3	82.4	-	-

Control fitosanitario

El manejo se hizo mediante el uso de productos químicos para el control y combate de plagas en las plantas tal como se aprecia en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Productos aplicados al pak choi y kale producidos en sustrato de perlita bajo invernadero.

Producto	Combate	Aplicación	Dosis	Fecha aplicación
Abamectina	Áfidos	Foliar	al 0.1%	24 de febrero de 2021
<i>Bacillus thuringiensis</i> (DiPel DF)	Gusano	Foliar	al 0.1%	28 de marzo de 2021

Cosecha

La cosecha del pak choi se realizó a los 52 días después del trasplante (ddt), una vez que los tratamientos habían alcanzado un tamaño comercial, y cortando la planta entera para la posterior evaluación de sus variables. Para el caso del kale, la cosecha se realizó a los 59 ddt, por cuestiones de tiempo, seleccionando las hojas comerciales del resto para hacer la determinación de longitud, ancho, peso fresco y número de hojas.

4.2.7. Variables evaluadas

4.2.7.1. Variables de desarrollo

Se evaluaron las mismas variables del experimento 1, se agregó la determinación de la concentración de NO_3^- en extracto celular de pecíolo, con un medidor Laquatwin ionómetro de nitratos de la marca Horiba[®], mediante la obtención del extracto y su posterior lectura de concentración con el sensor del ionómetro, reportando los valores obtenidos en mg L^{-1} .

4.2.7.2. Variable de producción

Se obtuvo el peso fresco por planta de cada tratamiento, se contabilizaron macetas por unidad experimental y se extrapoló a 1 ha.

4.2.7.3. Variables nutrimentales

Se determinaron los mismos elementos del experimento 1, tanto macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S), micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn, B, Mo y Ni) y nitratos en el material vegetal seco de ambos cultivos, con las mismas técnicas de laboratorio.

4.2.8. Análisis de datos

Los datos obtenidos siguieron el mismo proceso del experimento 1. A cada variable se le aplicó pruebas de normalidad Shapiro-Wilk ($\alpha=0.05$). Las variables que cumplieron con dicha prueba fueron sometidas a análisis de varianza (ANDEVA) con ($\alpha = 0.05$) y a sus distintas pruebas de normalidad de residuos, homocedasticidad e independencia. Después, se procedió a hacer la prueba de comparación de medias a través de la diferencia significativa honesta de Tukey (DSH) con un nivel de significancia ($\alpha = 0.05$).

Las variables que no cumplieron con la prueba de normalidad fueron analizadas a través de procedimientos no paramétricos de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$).

Los cálculos se apoyaron de los paquetes estadísticos Statistical Analysis System (SAS) versión 9.0 para Windows y R versión 4.0.2 para Windows.

4.3. Cinética de producción de hojas de pak choi y kale en función de la conductividad eléctrica y de la relación nitrato/amonio

Se realizó la cinética de producción de hojas en los cultivos de pak choi y kale en el primer experimento mediante un muestreo no destructivo, contabilizando el número total de hojas por planta de toda la unidad experimental (cuatro tratamientos: 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ por 10 repeticiones cada uno) en total 40 plantas en diferentes momentos del ciclo, primero a los 14 ddt luego a los 32 ddt y por último al momento de la cosecha (47 ddt en pak choi y 54 ddt en kale), excluyendo aquellas hojas amarillentas y marchitas.

En el segundo experimento se contaron de igual forma del número total de hojas por planta de los tres tratamientos (75/25, 50/50 y 25/75) en ambos cultivos a los 14, 28, 42 y 52 (pak choi) y 59 ddt (kale), no tomando en cuenta hojas amarillas y marchitas.

Al no ser un muestreo destructivo, se contabilizaron las hojas desde la más grandes hasta la más pequeña, evitando maltratar la planta, así como causar daños irreversibles, como quebrarlas.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Experimento 1. Conductividad eléctrica de la solución nutritiva Steiner en el desarrollo, producción y concentración nutrimental de plantas de pak choi y kale

5.1.1 Pak choi

5.1.1.1 Variables de desarrollo

Lecturas SPAD

Las lecturas SPAD mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos, las plantas que se desarrollaron en los tratamientos de 1.5 y 2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ de CE de la SN tuvieron una lectura mayor (56.57 y 57.69 respectivamente) en comparación con las lecturas de las plantas a 0.5 y 1.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ de CE de la SN (46.38 y 51.39 respectivamente) (Figura 13), con un incremento de las lecturas del 22 y 24% comparando las plantas del tratamiento a 1.5 y 2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ con aquellas del tratamiento a 0.5 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$, tal como reportan Cruz-Crespo *et al.* (2012) en el cultivo de jitomate, donde la solución Steiner al 75% y 100% incrementaron las lecturas SPAD en las hojas sobre una solución al 50%, en dos momentos diferentes después del trasplante (40 y 70 días), arrojando lecturas similares a las que se obtuvieron en la presente investigación (SN al 75% y 100% con valores de 55.94 y 57.33 respectivamente a los 40 ddt y 53.26 y 53.80 a los 70 ddt), por otra parte González *et al.* (2013) obtuvieron menores lecturas con una solución Steiner de 2 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ en algunas hortalizas de hoja, por ejemplo la albahaca, con una lectura SPAD de 35.66. En el cultivo de pak choi, Yost (2021) obtuvo una relación directa entre el contenido de clorofila y la CE; a medida que la CE aumenta (de 0.5 a 5.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$), mayor es el contenido de clorofila (de 44.0 a 50.4), Ding *et al.* (2018) por su parte obtuvieron un comportamiento similar en el cultivo de pak choi; a mayor CE mayor contenido de clorofila, aunque con valores inferiores (40.8-44.2 a 1.8-2.4 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ y 54.4 a 9.6 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$) a los obtenidos en esta investigación, a pesar de las diferencias en las lecturas en el mismo cultivo, ambas investigaciones dan un mayor contenido de clorofila a medida que aumenta la CE.

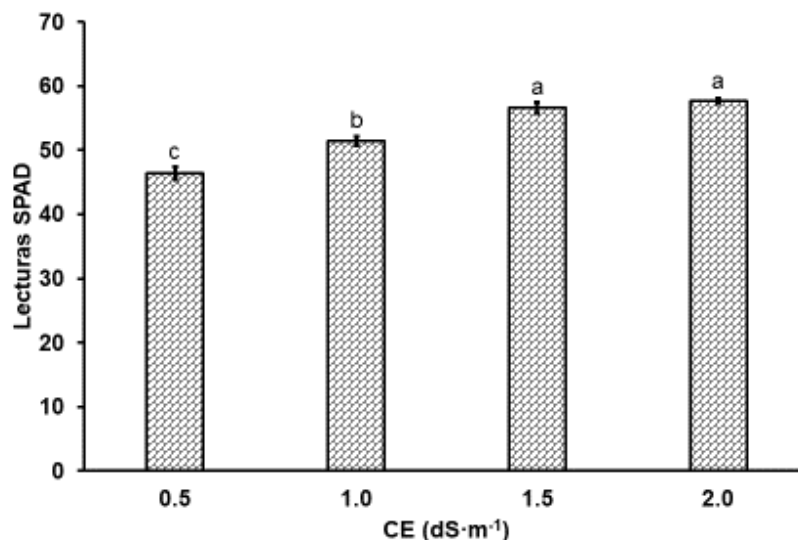


Figura 13. Lecturas SPAD en hojas de pak choi a 40 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.

Ca²⁺ y K⁺ en extracto celular de pecíolo (ECP)

En el extracto celular de pecíolo se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) tanto en la concentración de Ca²⁺ como en la de K⁺ por efecto de los tratamientos, hubo una mayor concentración de Ca²⁺ en las plantas regadas con SN a una CE de 0.5 dS·m⁻¹ (291 mg·L⁻¹) y una menor concentración en plantas a una CE de 2.0 dS·m⁻¹ (159 mg·L⁻¹), con una reducción del 45%. La concentración de K⁺ aumentó en forma proporcional a la CE de la SN: 14.8 mg L⁻¹ para 0.5 dS·m⁻¹ y 18.4 mg L⁻¹ con 2.0 dS·m⁻¹. El incremento equivale a 24%. (Figura 14). Yost (2021) en cultivo de pak choi encontró que la concentración de Ca está inversamente relacionada con la CE, a medida que aumenta la CE de la SN disminuye la concentración de Ca, de igual forma Currey *et al.* (2019) observaron la misma tendencia en cilantro, eneldo y perejil. Una CE alta de la solución limita la productividad de los cultivos, así como el contenido nutricional de Ca en lechuga disminuye por la CE de 2.4 dS·m⁻¹: de 13.9 a 16.7 y 20.2 g de Ca kg⁻¹ PS comparado con 0.6 y 1.2 dS·m⁻¹ (Albornoz y Lieth, 2015), la planta pierde agua y tiene que mantener un potencial hídrico más negativo para absorber el agua (Rodríguez, 2019). El Ca es un elemento que se absorbe por flujo de masas (Marschner, 2012), por tanto, a mayor CE, puede existir un estrés osmótico que

permita la pérdida de agua por la planta, lo que reduce la absorción del Ca y que este se exprese en concentraciones bajas. Se han encontrado efectos antagonísticos entre el Ca y el K, de acuerdo con Ramírez-Martínez *et al.* (2009), cuando aumenta la concentración de Ca en la solución, disminuye la acumulación de K en tejido vegetal de tulipán, y viceversa. Esto demuestra los resultados obtenidos en la presente investigación, en donde de igual forma se presenta un antagonismo de ambos elementos, en tanto uno aumenta el otro disminuye. Además, en un trabajo realizado por Bar-Tal y Dressman (1996) en cultivo de tomate, informan el antagonismo presente entre ambos elementos (Ca y K).

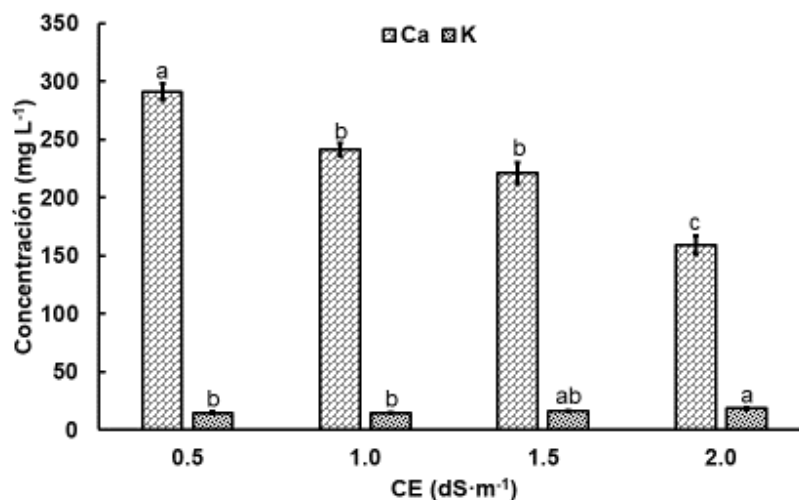


Figura 14. Concentración de calcio (Ca²⁺) y potasio (K⁺) en ECP de plantas de pak choi a 44 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.

Peso fresco

En el peso fresco de las plantas de pak choi se detectaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de tratamientos. Las plantas regadas con 2.0 dS·m⁻¹ tuvieron el mayor peso fresco (456 g) y un aumento del 266% en comparación con el peso fresco de las plantas regadas con 0.5 dS·m⁻¹ (124 g); a medida que aumenta la CE aumenta el peso fresco del cultivo (Figura 15). Carrasco *et al.* (2007) en el cultivo de albahaca obtuvieron un peso fresco mayor con 1.5 dS·m⁻¹, pero comparando con CE mayores (3.0 y 4.5 dS·m⁻¹), demostrando de esta manera una

disminución de la biomasa a CE altas, tal como lo demuestran Pérez-Vázquez *et al.* (2020), en pimienta morrón que es sensible a la salinidad ($CE\ 3.0\ dS\cdot m^{-1}$) y tiene un mayor desarrollo a una CE de $2.0\ dS\cdot m^{-1}$, Ding *et al.* (2018) obtuvieron un aumento gradual del peso fresco de pak choi a medida que aumentaron la CE (máximo $4.8\ dS\cdot m^{-1}$), a excepción de una CE de $9.6\ dS\cdot m^{-1}$, debido a la reducción del peso fresco, aunque a una CE entre 1.8 y $2.4\ dS\cdot m^{-1}$ presentaron pesos frescos no mayores a $150\ g$ por planta y a una CE de $4.8\ dS\cdot m^{-1}$ apenas y cerca de los $200\ g$ por planta, resultados muy inferiores a los obtenidos en la presente investigación, plantas a $2.0\ dS\cdot m^{-1}$ pesos promedios de $456\ g$. Por otro lado, Juárez-Rosete *et al.* (2014) encontraron que a mayor porcentaje de la SN (100 y 125%) CE de 2.0 y $2.5\ dS\cdot m^{-1}$, respectivamente, obtuvieron mayor peso fresco en el cultivo de menta por encima de las plantas tratadas con menor porcentaje de la SN. Juárez-Rosete *et al.* (2019) obtuvieron mayor peso fresco de orégano en una SN al 75% ($1.5\ dS\cdot m^{-1}$) y Parks y Murray (2011) encontraron crecimientos mayores de pak choi en el intervalo 1.5 - $2.5\ dS\cdot m^{-1}$ y una disminución del mismo a CE de 0.5 y arriba de $2.5\ dS\cdot m^{-1}$.

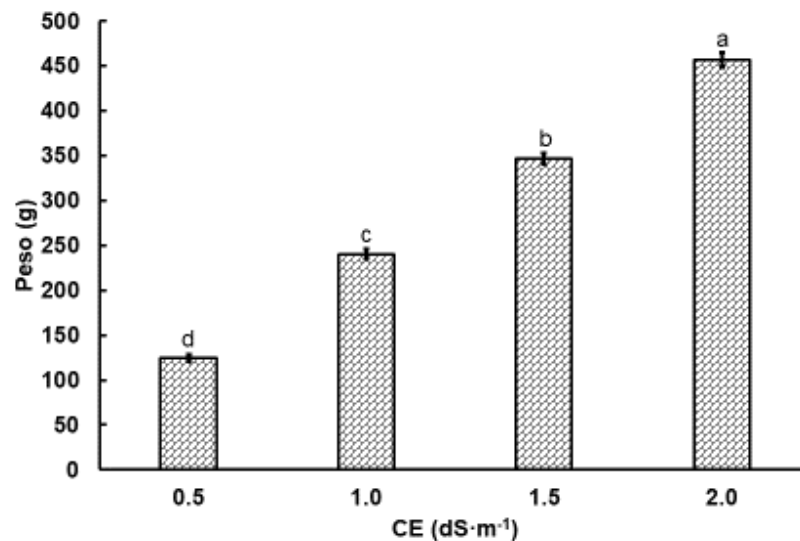


Figura 15. Peso fresco de plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p\leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.

Área foliar

El área foliar del pak choi tuvo el mismo comportamiento que el peso fresco, esto es, a mayor CE de la SN hubo mayor área foliar del cultivo (Figura 16). A una CE de $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ el área foliar fue de 3101 cm^2 , con un aumento de 188% respecto a las plantas que menor área foliar presentaron ($0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) con 1078 cm^2 . De acuerdo con Cruz-Crespo *et al.* (2012), el área foliar de las hojas del cultivo de tomate tuvo la misma tendencia de crecimiento que el pak choi, puesto que una SN al 100% ($2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) en ambos casos generó una mayor área foliar en comparación con los otros tratamientos (25, 50 y 75%), mientras más diluida fue la SN, menor el área foliar hubo en la planta. Por otra parte, Tabatabaie *et al.* (2007) obtuvieron mayor área foliar en menta a una CE de $1.4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y una menor área a $0.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, tendencia similar con los resultados de la investigación, y también menciona que a CE mayores (2.8 y $5.6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) el área foliar igual disminuye. Ding *et al.* (2018) estudiaron el efecto de la CE en pak choi y observaron que a medida que aumenta la CE aumentaba el área de las hojas (hojas más grandes) hasta una CE de $4.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y al aumentar la CE al doble ($9.6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) el tamaño de la hoja más grandes disminuía, por tanto, se observa una relación en ambas investigaciones, al tener mayor área de las hojas a medida que aumenta el suministro nutrimental en las plantas. Por otra parte, en el cultivo de lechuga a CE de 1.4, 2.0 y $3.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ no hubo diferencias estadísticas en el área foliar, a pesar de tener una media mayor en el área foliar de las plantas del tratamiento a $1.4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Samarakoon *et al.*, 2006).

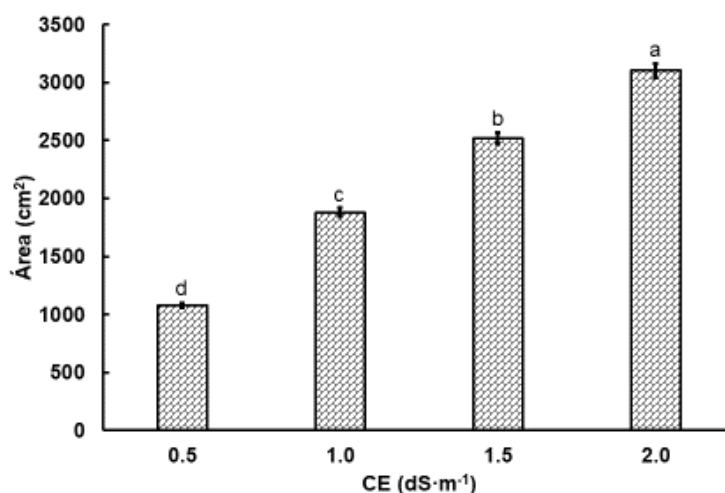


Figura 16. Área foliar de plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.

Diámetro de tallo

El diámetro de tallo del pak choi tuvo diferencias estadísticamente significativas por efecto de la CE. A una CE de 1.5 y 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ fueron estadísticamente similares entre sí (21.497 mm y 21.163 mm respectivamente) pero superiores en un 31 y 33% respecto al diámetro del tallo de las plantas regadas a 0.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (16.127 mm), lo que indica que, a CE mayores, los tallos del pak choi fueron más gruesos (Cuadro 14), de igual manera Cruz-Crespo *et al.* (2012) obtuvieron tallos de tomate con mayor diámetro en una SN al 100%, aunque similar estadísticamente con la SN al 50% y 75% y superiores a la de 25%.

Resistencia a la penetración

En la resistencia a la penetración del tallo de pak choi se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($p\leq 0.05$) (Cuadro 12), a medida que la CE de la SN aumentó, el tallo opuso menor resistencia, los tallos de las plantas tratadas con una CE de 0.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de la SN fueron los que mayor resistencia presentaron (1.605 kg) en comparación con los demás tratamientos, y las plantas regadas con una CE de 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ presentaron menor resistencia (1.061 kg) en un 34% menos que las regadas con una SN de 0.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE, de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-FF-058-SCFI-2006 dicha determinación de resistencia a la penetración se hace en fruta fresca y determina la oposición que presenta el fruto a la introducción del émbolo del penetrómetro, con lo cual los tallos del pak choi son muy carnosos de acuerdo a Fordham (2003), lo que indica que las plantas regadas con una SN a 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ presentan una menor resistencia a ser penetrado, teniendo así tallos con menor resistencia de su pulpa o carnosidad. Scuderi *et al.* (2009) en cultivo de lechuga a tres niveles de CE (2.8, 3.8 y 4.8 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$), encontraron que a una CE mayor produjo una media de la resistencia mayor (aprox. 1.350 kg) a un día del corte, para el caso del pak choi fue lo contrario, puesto que a menor CE fue mayor la firmeza presentada por el tallo. La concentración del calcio en el cultivo, tanto en ECP como en tejido vegetal, fue mayor a menor CE, lo que tiene una relación directa con la resistencia a la penetración; a mayor concentración de Ca en ECP y tejido vegetal, mayor resistencia a la penetración, coincidiendo con Contreras-Ángulo *et al.* (2011); el calcio al formar puentes de cadenas de pectina refuerza la pared celular de los cultivos.

Cuadro 12. Diámetro de tallo y resistencia a la penetración en plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	Diámetro de tallo (mm)	Resistencia a la penetración (kg)
0.5	16.127±0.3087 c	1.605±0.0475 a
1.0	18.749±0.4002 b	1.434±0.0476 ab
1.5	21.497±0.4964 a	1.319±0.0445 b
2.0	21.163±0.2595 a	1.061±0.0429 c
R ²	0.784	0.676
CV (%)	6.15	10.66
DHS	1.437	0.174

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Peso seco de tallo y hoja

El peso seco de tallo y de hoja tuvieron una respuesta similar en función a la CE de la SN, esto es, al incrementarse dicha CE, la respuesta de las plantas fue favorable, por tanto, existió diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos, tal como se aprecia en la Figura 17.

Las plantas regadas con SN a 2.0 dS·m⁻¹ de CE tuvieron un mayor peso seco tanto del tallo como de la hoja (15.70 g y 16.57 g respectivamente), presentando un aumento del 212% y 160% en comparación con los pesos secos de tallo y hoja obtenidos en plantas regadas con una SN de 0.5 dS·m⁻¹ (5.0308 y 6.3636 g respectivamente). Además, obteniendo el peso seco total, de igual forma las plantas regadas con SN a 2.0 dS·m⁻¹ de CE tienen un peso seco mayor (32.28 g), aumentando su peso en un 183% con aquellas regadas con SN a 0.5 dS·m⁻¹ de CE (11.39g). Juárez-Rosete *et al.* (2014) en el caso del peso seco de la parte área (tallo + hoja) del cultivo de menta a una SN al 100% (CE 2.0 dS·m⁻¹), distinguieron mayor peso seco, en tanto Juárez-Rosete *et al.* (2019), en orégano obtuvieron un mayor peso seco del área foliar con una SN al 75% (1.5 dS·m⁻¹) en casi los 4 cortes que se hicieron, con la constante de que las plantas tratadas con una SN al 25% fueron las que menor peso tuvieron en los cuatro cortes. Huang *et al.* (2010) observaron que a medida que

aumentaba la concentración de nutrientes (0.5, 1.0 y 2.0 de la solución nutritiva) aumentaba el peso seco de las plantas en la col china, aunque a una CE de 1.0 y 2.0 no existió diferencias significativas. En cultivos de hoja, se puede citar que existe un efecto de la CE de la SN en el peso seco, influido por los niveles o concentración de la SN y que el crecimiento y desarrollo de las plantas está íntimamente relacionada con el suministro de nutrientes, ya que se podría inhibir el crecimiento debido a la toxicidad o deficiencia de los nutrientes (Ding *et al.*, 2018).

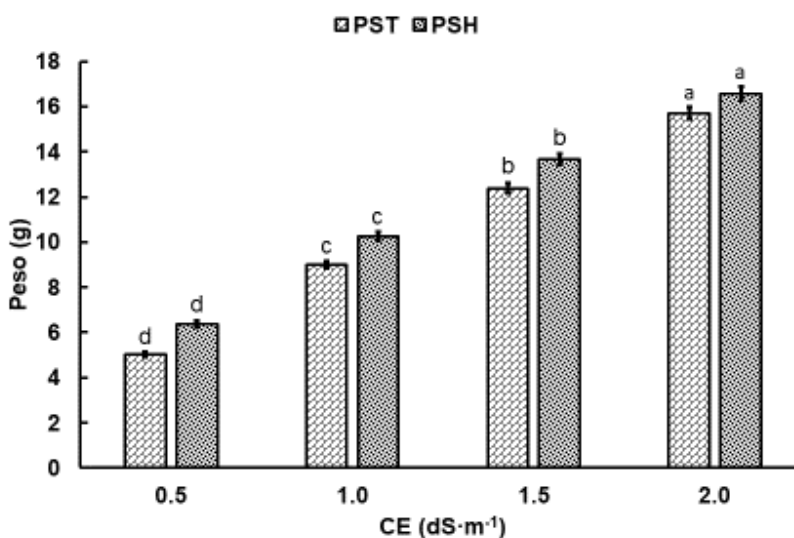


Figura 17. Peso seco de tallo (PST) y peso seco de hoja (PSH) de plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.

Volumen, longitud y peso seco de raíz

El volumen radical, la longitud radical y el peso seco de la raíz no tuvieron un comportamiento normal y se hizo una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Dichas variables presentaron diferencias estadísticamente significativas como se muestra en el Cuadro 13, lo que indica que existe un efecto en las variables por los tratamientos.

El volumen, la longitud y el peso seco de la raíz fueron mayores en plantas regadas con 1.5 dS·m⁻¹ (69 cm³, 53 cm y 5.021 g respectivamente), a esta CE se generaron raíces más grandes que los demás tratamientos, las plantas tratadas con una SN a 0.5 dS·m⁻¹ de CE presentaron menor

producción de raíces, lo que se vio reflejado en el volumen, longitud y peso seco (38 cm³, 40 cm y 2.619 g respectivamente), existió un aumento del 82% en el volumen, 33% en la longitud y 92% en el peso seco comparando los resultados anteriormente mencionados. Perzabal-Ramos *et al.* (2018) no apreciaron diferencias en dos tratamientos de la SN (50% y 100%) tanto en peso seco de la raíz como en la longitud en el cultivo de espinaca. Yang *et al.* (2021) en cultivo de arúgula, observaron que el peso seco de la raíz a una CE de 1.2 dS·m⁻¹ era menor respecto a otras tres CE mayores (1.5, 1.8 y 2.1 dS·m⁻¹), las cuales fueron similares entre sí, también existen estudios donde a una CE alta hay una reducción en el peso seco de la raíz, Samarakoon *et al.* (2019) en el cultivo de lechuga, a una CE de 1.2 mS·cm⁻¹ alcanzó su máximo peso y a medida que aumentó la CE (1.8 y 2.4 mS·cm⁻¹) disminuyó de igual forma el peso seco, caso similar ocurrió en el cultivo de pak choi, en donde alcanzó un máximo volumen, longitud y peso seco a una CE de 1.5 dS·m⁻¹ y a una CE mayor (2.0 dS·m⁻¹) disminuyó en todas las variables radicales.

Cuadro 13. Volumen, longitud y peso seco de raíz en plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	Volumen radical (cm ³)	Longitud radical (cm)	Peso seco de raíz (g)
0.5	38.000±1.0541	39.700±1.0858	2.6189±0.600
1.0	49.500±2.4732	43.700±2.4588	3.5929±0.2017
1.5	69.300±2.9704	53.400±1.7901	5.0211±0.3245
2.0	53.000±1.9264	45.900±1.0899	3.8047±0.1539
Chi cuadrada	29.060	20.659	29.384
pχ ²	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Significancia	**	**	**

Media ± error estándar ** pχ²≤0.05 indica significancia estadística.

5.1.1.2 Variable de producción

La producción del cultivo de pak choi está en función de la planta en su totalidad, ya que la venta al público se hace en esa presentación, es decir, el rendimiento se obtuvo mediante el peso en fresco de una planta, considerando 35,000 plantas·ha (valor obtenido en función del experimento). Al momento de la cosecha (47 ddt) al obtener los pesos por planta, se calculó el rendimiento por ha (Cuadro 14) y existió diferencias estadísticas significativas ($\alpha \leq 0.05$) por efecto de la CE, se muestra que a una CE de 2.0 dS·m⁻¹ se obtuvo el mayor rendimiento de pak choi (15.971 Mg·ha⁻¹), con un aumento del 265% respecto al rendimiento del tratamiento a una CE de 0.5 dS·m⁻¹ (4.370 Mg·ha⁻¹), lo que demuestra el efecto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva en la producción de pak choi en maceta bajo invernadero.

Cuadro 14. Rendimiento de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	Rendimiento (Mg·ha ⁻¹)
0.5	4.370±0.1257 d
1.0	8.415±0.1765 c
1.5	12.127±0.2019 b
2.0	15.971±0.2774 a
R ²	0.980
CV (%)	6.277
DHS	0.773

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) ± error estándar. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Ding *et al.* (2018) obtuvieron que al aumentar la CE de la SN se promueve un mayor peso fresco y tamaño de hojas en el cultivo de pak choi, lo que resulta en plantas más grandes y a su vez un mayor rendimiento. Cho y Son (2007) en el cultivo de pak choi hidropónico obtienen un mayor rendimiento del cultivo por área a CE de 2.0 y 2.5 dS·m⁻¹ (experimentando a CE de 0.5, 1.0, 1.5,

2.0 y 2.5 dS·m⁻¹), al igual que mayor número de hojas por planta, así como más largas y más anchas, lo que implica un mayor rendimiento al tener plantas más grandes. De acuerdo al SIAP al cierre del año 2017 la producción en México fue de 24.85 Mg·ha⁻¹ en campo. Los cálculos realizados a la densidad de población, se tomó en cuenta una producción en maceta, lo que repercute en el espacio del invernadero, para obtener mayor producción podría optimizarse el espacio y aumentar la densidad, de acuerdo con Scuderi *et al.* (2013) la densidad de siembra y tiempo de cosecha influye en la producción de peso fresco de col china.

5.1.1.3 Concentración nutrimental

Macronutrientes

La concentración de N en el tejido vegetal de las plantas regadas con diferentes SN (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 dS·m⁻¹) tuvieron diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos (Cuadro 15). Las plantas regadas con SN a 2.0 dS·m⁻¹ fueron las que mayor concentración de N tuvieron (37.706 g·kg⁻¹) y mientras la CE de la SN disminuyó, de igual forma disminuyó la concentración nutrimental, de esta manera las plantas tratadas con una SN a 0.5 dS·m⁻¹ de CE fueron las que menor concentración del elemento tuvieron (19.264 g·kg⁻¹), por tanto, hubo un aumento del 96% en la concentración del elemento entre la CE menor respecto a la mayor. En cultivos de hoja varios autores han demostrado el efecto de la CE de la solución nutritiva en las concentraciones de los macroelementos en el tejido vegetal, por una parte Yost (2021) observó un aumento de 4.47% a 5.31% en la concentración de N en el cultivo de pak choi, de una CE de 0.5 a 5.0 dS·m⁻¹, lo que representa una relación directamente proporcional de la concentración de elemento al aumentar la CE de la solución en las plantas de pak choi, de la misma forma Samarakoon *et al.* (2019) encontraron una relación directa entre el aumento de la CE y un mayor absorción del N por las hojas del cultivo de lechuga, Huang *et al.* (2010) en col china observaron que a una concentración de 2.0 de la solución nutritiva disminuían la concentración de algunos elementos a excepción del N, lo que significa que de igual forma a una CE mayor hay una concentración mayor de elemento en las hojas de col china. En otros cultivos, el comportamiento de la concentración del elemento es distinto, por ejemplo, López-Ordaz *et al.* (2011) en hojas jóvenes de plantas de mango documentaron que no existen diferencias significativas por efecto de

concentraciones (baja, suficiente, alta) de la solución Steiner en la concentración de N, mientras tanto Cruz-Crespo *et al.* (2014) en chile serrano, observaron que la SN al 75% tuvo mayor concentración de N por encima de SN al 25% y 50%, lo que se asemeja al comportamiento del cultivo de estudio, a mayor CE mayor concentración de N en tejido vegetal.

En las concentraciones de P, K y S se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos. Las plantas regadas con una SN a $1.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ de CE presentaron una mayor concentración en estos elementos ($2.994 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $17.483 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ y $10.211 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectivamente), además, en todos estos casos, las plantas regadas con una SN a $0.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ fueron las que menor concentración de los elementos tuvieron ($2.387 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $12.807 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ y $8.274 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectivamente), tomando como referencia estos últimos datos, hubo un aumento del 25% en P, 37% en K y 23% en S. Esto significa, que a CE por debajo de $1.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ (0.5 y $1.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) y mayores de esta CE ($2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) hay menor concentración de los elementos. A una CE de $1.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ de la SN Juárez-Rosete *et al.* (2019) en el cultivo de orégano, identificaron que SN altas (100% y 125%) tienen mayor concentración de P en varias fechas de cosecha, aunque estadísticamente no distan mucho de las SN con menor % con el paso del tiempo, caso similar al del K en donde también Juárez-Rosete *et al.* (2019) obtienen concentraciones mayores del elemento en SN al 75%, 100% y 125%, situación que se repite a lo largo del tiempo (varias fechas de cosecha). Yost (2021) en cultivo de pak choi hace referencia a un incremento del porcentaje de azufre (de 0.51% a 86%) a medida que aumenta la CE de la SN (de 0.5 a $5.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$). Samarakoon *et al.* (2019) en cultivo de lechuga distinguieron que a medida que aumenta la CE (de 0.8 a $2.4 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$) aumenta la concentración de K. La concentración de P y S aumentaron de una CE de 1.2 a $1.8 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, y no hubo efecto a una CE de $2.4 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$.

En la concentración de Ca en plantas de pak choi se distinguieron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos. Las plantas regadas con una SN a $1.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ de CE tuvieron una mayor concentración ($16.101 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) respecto a los otros 3 tratamientos como se observa en el Cuadro 16, siendo las plantas tratadas con una CE de $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ las que menor concentración del elemento tuvieron ($12.085 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), con una disminución del 25%, es decir, a mayor CE de la SN no hubo una mayor concentración del elemento como en el caso del N. En cultivos como el chile serrano, Cruz-Crespo *et al.* (2014) reportan que una SN al 75% aporta una mayor concentración del elemento en las hojas en dos tiempos de cosecha (40 y 80 días), en la

primera cosecha teniendo una concentración similar con la SN al 50%. En el cultivo de pak choi se observó que a medida que la CE aumentaba, la concentración de Ca disminuía de 2.20% a 1.32% (Yost, 2021). Los resultados de la concentración del Ca del ECP y tejido vegetal siguen un mismo comportamiento, a CE altas menor concentración del elemento en las hojas, como se mencionó anteriormente, se puede deber a un estrés osmótico por el aumento de las sales en solución (Albornoz y Lieth, 2015), lo que repercute en una pérdida de agua por parte de la planta (Rodríguez, 2019), esto afecta la absorción del Ca al ser un elemento que entra a la planta por flujo de masas (Marschner, 2012).

La concentración de Mg en plantas de pak choi tuvo diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos, las plantas regadas con una SN a 0.5 y 1.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE fueron similares entre sí, presentando mayor concentración ($5.664 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $5.837 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente) con respecto a las plantas regadas con una SN a 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE ($4.858 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), en donde hubo una disminución de la concentración en las plantas en 14% y 17%, se observó una tendencia similar a la concentración de calcio, a una CE menor ($0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) hubo mayor concentración que a una CE mayor ($2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$). Yost (2021) hace mención que a un incremento de la CE de la SN existe una disminución de la concentración de Mg de 0.52% a 0.34%, tal como se aprecia en la presente investigación, que existe una disminución de la concentración a medida que aumenta la CE, mientras tanto, Samarakoon *et al.* (2019) en cultivo de lechuga observaron una ligera disminución de la concentración de Mg cuando la CE pasa de 1.8 a 2.4 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, en tanto existe una menor concentración en los tratamientos regados a una CE de 0.8 y 1.2 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$.

De acuerdo con Mills y Jones (1996), los intervalos de suficiencia de macronutrientes en pak choi son: N (2.39-5.51%), P (0.36-0.80%), K (2.86-5.74%), Ca (1.29-3.21%), Mg (0.19-0.35%) y S (0.41-0.77%). Los valores obtenidos en el presente trabajo al dividirlos entre 10 obtenemos los porcentajes, teniendo de esta manera en el caso del N valores dentro del rango a CE de 1.5 y 2 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, en P y K todos los valores fuera del intervalo (menores en el experimento), en Ca valores dentro del intervalo a 0.5, 1.0 y 1.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y en Mg y S valores mayores en el experimento en comparación con los intervalos.

Cuadro 15. Concentración de N, P y K en parte aérea de plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	N	P	K
	g·kg ⁻¹		
0.5	19.264±0.8470 d	2.387±0.0569 c	12.807±1.3098 b
1.0	23.728±0.8470 c	2.729±0.0468 b	13.522±0.7962 ab
1.5	31.480±0.5120 b	2.994±0.0663 a	17.483±1.0657 a
2.0	37.706±0.7336 a	2.663±0.0237 b	16.990±0.8729 ab
R ²	0.978	0.900	0.666
CV (%)	4.62	3.28	11.74
DHS	3.385	0.231	4.667

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. N = Nitrógeno, P= Fósforo y K = Potasio. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Cuadro 16. Concentración de Ca, Mg y S en parte aérea de plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	Ca	Mg	S
	g·kg ⁻¹		
0.5	15.630±0.2840 ab	5.664±0.2316 a	8.274±0.4298 b
1.0	16.101±0.3093 a	5.273±0.0950 ab	8.981±0.1840 ab
1.5	14.395±0.2387 b	5.837±0.0892 a	10.211±0.1307 a
2.0	12.085±0.3658 c	4.858±0.1567 b	9.256±0.3654 ab
R ²	0.929	0.750	0.723
CV (%)	3.61	4.94	5.73
DHS	1.372	0.699	1.376

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. Ca = Calcio, Mg = Magnesio y S = Azufre. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Nitratos

Los datos de concentración de nitratos en las plantas de pak choi no tienen un comportamiento de acuerdo con la distribución normal por lo que fueron sometido a las pruebas no paramétricas de Kruskal Wallis ($p \leq 0.05$) y se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos (Cuadro 17); a mayor CE en la SN mayor concentración de NO_3^- en el tejido foliar, 6.018% a $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ y 0.263% a una CE de $0.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. Se observa el efecto de la CE sobre la concentración de nitratos (%). Haciendo conversiones a $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{kg}^{-1}$, se tiene que todos los valores están por arriba de la concentración media alta de nitratos en hojas de pak choi, de 700 a $900 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ en peso fresco de acuerdo con Munekata *et al.* (2020). Valencia *et al.* (2015) en un estudio sobre los contenidos de nitratos en brócoli, encuentran promedios desde 521.4 hasta 5638.2 $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{kg}^{-1}$ (base seca) lo que permite deducir que a una CE de $0.25 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ aun es permitido y a una CE de $1.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ estaría en los límites. Por su parte Correia *et al.* (2010) en brassicas encontraron contenidos mínimos de 41 y 54 $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{kg}^{-1}$ y máximos de hasta 939 y 1447 $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{kg}^{-1}$. De acuerdo al Reglamento (UE) No 1258/2011 del Diario Oficial de la Unión Europea, en cultivos de hoja como las espinacas se permiten contenidos máximos de 3500 $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{kg}^{-1}$, y en lechugas hasta 5000 $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{kg}^{-1}$, lo que permite inferir que los valores de nitrato en pak choi obtenidos en la presente investigación están por arriba de los límites permitidos.

Cuadro 17. Concentración de nitratos (NO_3^-) en plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	NO_3^- (%)
0.5	0.263 ± 0.0270
1.0	0.590 ± 0.0273
1.5	2.527 ± 0.1888
2.0	6.018 ± 0.1968
Chi cuadrada	10.458
$p\chi^2$	0.0151
Significancia	**

Media \pm error estándar ** $p\chi^2 \leq 0.05$ indica significancia estadística.

Micronutrientos

La CE de la SN no afectó las concentraciones de Fe y Cu en las plantas de pak choi, a pesar de que numéricamente las plantas regadas con $1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ tuvieron una concentración mayor en Fe (121.66 ppm), mientras tanto aquellas plantas tratadas con una SN a $0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE tuvieron una concentración mayor en Cu (20.90 ppm) (Cuadro 18). Yost (2021) en cultivo de pak choi encontró concentraciones similares de Fe ($126 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) e inferiores en Cu ($6.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), y observó que no hubo efecto en ambos elementos por CE, tal como se obtuvo en el presente trabajo. Por otra parte, Samarakoon *et al.* (2019) hacen referencia a que no hubo diferencias en las concentraciones de Fe por efecto de la CE, pero sí ocurrió en Cu, al pasar de una CE de 1.2 a $1.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, aunque se mantuvo similar esta última CE con una de $2.4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

En la concentración de Zn si se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($p\leq 0.05$) por efecto de los tratamientos, las plantas regadas con una SN a 1.0, 1.5 y $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE tuvieron concentraciones similares entre sí (28.81, 31.75 y 31.85 ppm respectivamente), con un aumento en la concentración del 21, 34 y 34% respecto a las plantas tratadas con una CE de $0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de la SN (23.74 ppm). Yost (2021) encontró una concentración mayor en pak choi (de 72.69 a $92.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) a medida que aumentaba la CE (0.5 a $5.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), dicho comportamiento se asemeja a la concentración de Zn en ésta investigación, comparando los valores a una CE de 0.5 a $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (de 23.84 a 31.85 ppm), aunque por debajo de los resultados obtenidos por Yost. Por otra parte, en cultivo de lechuga, Samarakoon *et al.* (2019) observaron el mismo comportamiento que en Cu; un aumento de la concentración al pasar de una CE de 1.2 a $1.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y manteniéndose a una de $2.4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

La concentración de Mn fue mayor en tejido vegetal de plantas tratadas con una CE de 1.0 y $1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (114.46 ppm y 118.57 ppm respectivamente), con aumentos del 18 y 23% respecto a la concentración de plantas regadas con una SN a $0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (96.77 ppm), que estadísticamente fue similar a aquellas regadas con la SN de $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (96.91 ppm), se aprecia que el tratamiento con CE más baja y más alta, son los que menor concentración del elemento tuvieron, esta tendencia se puede observar en el trabajo de Yang *et al.* (2021) en cultivo de arúgula, donde a una CE de $1.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ se presentó la mayor concentración de Mn y a CE extremas (menor de 1.2 y mayor de $2.1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) se presentaron las concentraciones más bajas.

En la concentración de B en el tejido foliar se detectó diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos, a una CE de $1.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ fue mayor la concentración ($64.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) y tal como se observa en Cuadro 19, los otros tres tratamientos fueron similares entre sí ($53.14, 55.45$ y $55.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), mientras que la concentración de Mo no tuvo diferencias desde la CE 1.0 hasta la 2.0, con una concentración menor en $0.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ de $2.2627 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

De acuerdo con Mills y Jones (1996) los intervalos de micronutrientes en pak choi son: Fe (85-363 ppm), Mn (35-52 ppm), B (19-39 ppm), Cu (3-7 ppm), Zn (14-38 ppm) y Mo (1.5-6.4 ppm), en tanto en el experimento, el Fe, Zn y Mo, los cuatro tratamientos ($0.5, 1.0, 1.5$ y $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) están dentro de los intervalos, mientras que en Mn, B y Cu todos los tratamientos están, según Mills y Jones (1996), en exceso.

Cuadro 18. Concentración de Fe, Cu, Zn y Mn en parte aérea de plantas de pak choi a los 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	Fe	Cu	Zn	Mn
	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			
0.5	115.22±7.044 a	20.90±1.849 a	23.74±0.329 b	96.77±3.729 b
1.0	101.38±5.686 a	16.11±0.646 a	28.81±0.630 a	114.46±2.359 a
1.5	121.66±4.586 a	20.48±1.079 a	31.75±0.594 a	118.57±5.241 a
2.0	103.40±4.731 a	20.29±1.040 a	31.85±1.056 a	96.91±3.178 b
R ²	0.528	0.553	0.917	0.776
CV (%)	8.78	10.98	4.19	6.13
DHS	25.354	5.584	3.180	17.102

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) ± error estándar. Fe = Hierro, Cu = Cobre, Zn = Zinc y Mn = Manganeseo. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Cuadro 19. Concentración de B y Mo en parte aérea de plantas de pak choi a 47 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	B	Mo
	mg·kg ⁻¹	
0.5	53.14±1.0412 b	2.2627±0.3326 b
1.0	55.45±1.1072 b	3.3463±0.1870 a
1.5	64.60±1.4619 a	3.7000±0.1276 a
2.0	55.34±0.1670 b	4.1100±0.1605 a
R ²	0.897	0.834
CV (%)	3.21	11.18
DHS	4.790	0.981

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. B = Boro y Mo= Molibdeno. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

5.1.2 Kale

5.1.2.1 Variables de desarrollo

Lecturas SPAD

Las lecturas SPAD de hojas de kale mostraron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de la CE (Figura 18); la mayor intensidad de verdor se presentó en las plantas regadas con la SN a 2.0 dS·m⁻¹ de CE (64.92) con un aumento del 29% respecto a las lecturas SPAD de las plantas regadas con una SN a 0.5 dS·m⁻¹ de CE (50.36) donde se obtuvo los valores más bajos. A medida que la CE de la SN disminuyó las lecturas SPAD fueron más bajas. Valenzuela *et al.* (2014), en el cultivo de tomate obtuvieron en la SN al 100% (2.0 dS·m⁻¹) lecturas SPAD de 58.75 a 150 ddt, mayores a las lecturas en las plantas a una SN al 25% y 50%, destacando que a 110 ddt y 116 ddt todos los tratamientos fueron estadísticamente similares, no hubo efecto de la solución nutritiva en el verdor de las hojas hasta el final.

Yang *et al.* (2021) en el cultivo de arúgula, observaron el efecto en las lecturas al paso del tiempo, a medida que avanzaba el ciclo del cultivo, las lecturas SPAD iban siendo mayores, además del efecto de las diferentes CE de la SN (1.2, 1.5, 1.8 y 2.1 dS·m⁻¹), con lecturas más bajas a una CE

menor ($1.2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) a los 22 ddt y con lecturas mayores en las plantas tratadas con CE de 1.5 y 1.8 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ a los 28 ddt.

La variación de las lecturas podría deberse a la concentración de elementos como el N, en el presente trabajo, se tienen concentraciones mayores de N en el tejido vegetal al aumentar la CE de la SN, por tanto, a mayor CE mayor N, así como mayores lecturas SPAD y viceversa, a CE altas hay un mayor contenido de clorofila en las hojas y un color verde más intenso (Ding *et al.*, 2018).

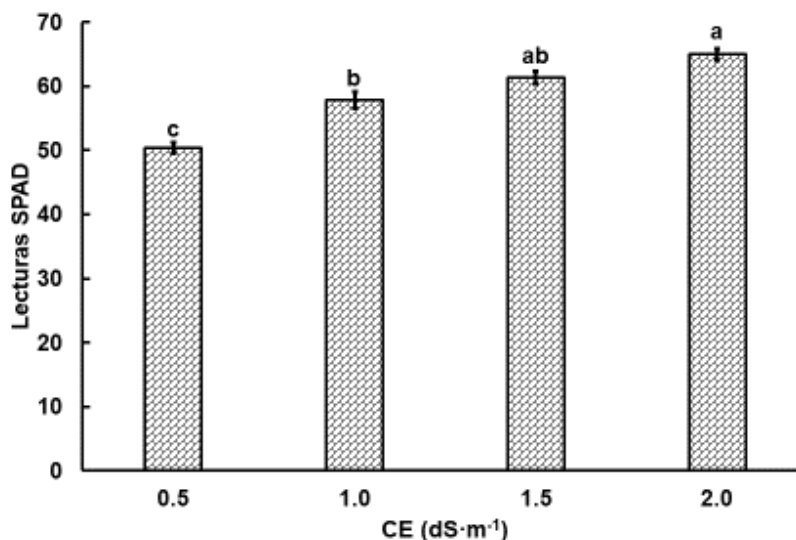


Figura 18. Lecturas SPAD en hojas de kale a 40 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.

Ca²⁺ y K⁺ en extracto celular de pecíolo (ECP)

Los datos de la concentración de Ca²⁺ en el ECP presentaron diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos (Figura 19), las plantas regadas con una SN a $1.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE presentaron mayor concentración del elemento (280 ppm), con un aumento del 54, 79 y 88% respecto a las concentraciones de las plantas regadas a 0.5 , 1.5 y $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de la SN (182, 156 y 149 ppm respectivamente), destacando que a CE mayores de $1.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (1.5 y $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) la concentración de Ca disminuyó.

Yost (2021) en kale identificó una disminución de la concentración de Ca de 2.46 a 1.83% debido al aumento de la CE de 0.5 a 5.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, lo que se asemeja a los resultados obtenidos en la presente investigación, a una CE mayor hay menor concentración de Ca^{2+} en el ECP, y a una CE menor ($1.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) una mayor concentración del elemento. Albornoz y Lieth (2015) lo asocian a un estrés osmótico, alto contenido de sales, la planta tiene un potencial hídrico más negativo y absorbe poca agua (Rodríguez, 2019) y el calcio al moverse por flujo de masas (Marschner, 2012), existirá menor concentración de Ca en las hojas.

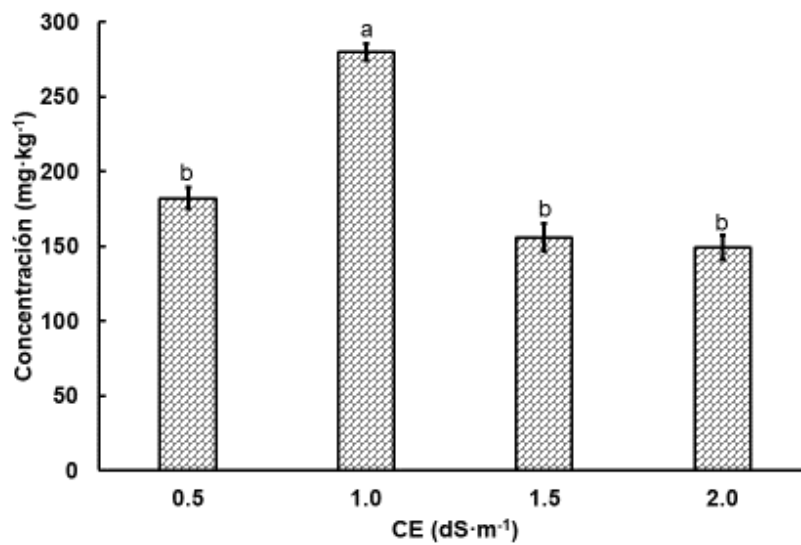


Figura 19. Concentración de calcio (Ca^{2+}) en ECP de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p\leq 0.05$) En la gráfica se indica el error estándar.

Los datos de la concentración de K^+ en ECP no tuvieron homogeneidad de varianza, por lo que se realizó una prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, se observa que existe diferencia estadísticamente significativa (Cuadro 20), en donde las plantas regadas con una SN a $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE tuvieron una mayor concentración del elemento (15.6 ppm) con un aumento del 28% con respecto a la concentración de las plantas regadas con una SN de $0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE (12.6 ppm), con una relación directa entre el aumento de la CE y el aumento de la concentración del elemento. Las concentraciones altas de K^+ podrían ser antagonicas con las concentraciones de Ca^{2+} como lo

sugieren Ramírez-Martínez *et al.* (2009) y Bar-Tal y Dressman (1996), en donde en cultivos de tulipán y tomate observan un antagonismo entre ambos elementos, por las altas concentraciones de Ca^{2+} y bajas de K^+ o viceversa.

Cuadro 20. Concentración de potasio (K^+) en ECP de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	K^+ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0.5	12.200±0.8794
1.0	11.600±0.4269
1.5	14.700±0.3667
2.0	15.600±0.9911
Chi cuadrada	15.667
$p\chi^2$	0.0013
Significancia	**

Media ± error estándar ** $p\chi^2\leq 0.05$ indica significancia estadística.

Peso fresco Total

El peso fresco total del kale tuvo diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos, las plantas regadas con una SN de $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE presentaron mayor peso fresco total (209.736 g) con un aumento del 263% con respecto al peso de las plantas regadas con una SN de $0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE (57.725 g), que fue la de menor peso, como se puede observar en la Figura 20, a medida que la CE de la SN aumenta, se incrementa en forma proporcional el peso fresco de las plantas. Juárez-Rosete *et al.* (2019) reportaron un mayor peso fresco en una solución nutritiva al 75% ($1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) en el cultivo de orégano comparado con niveles más bajos (25 y 50%) y más altos (100 y 125%), en ambos casos se disminuyó el peso fresco de las plantas de orégano; por otra parte, Juárez-Rosete *et al.* (2014) en el cultivo de menta obtuvieron mayor peso fresco en los tratamientos con SN al 125%, esta tendencia se presentó a lo largo del ciclo de cultivo desde el inicio hasta el final, donde la SN al 25% generó menor peso fresco de la biomasa en el cultivo de menta.

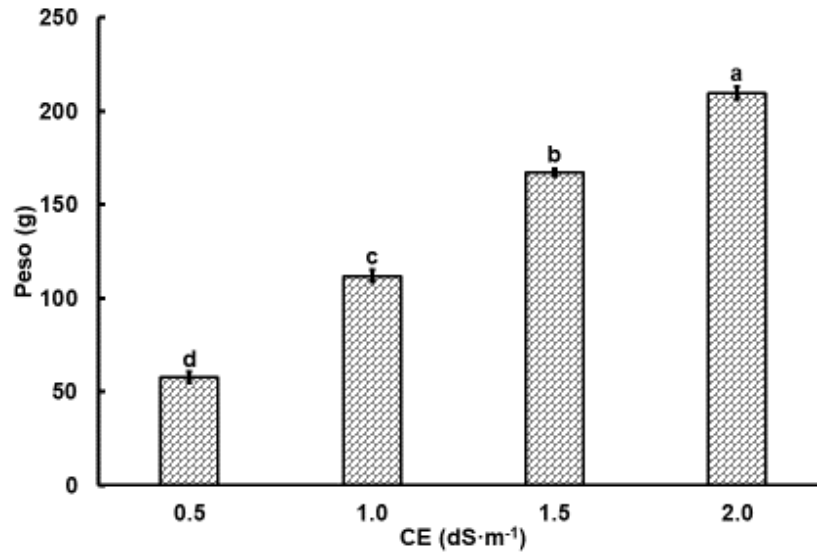


Figura 20. Peso fresco de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.

Diámetro de tallo

En el diámetro de tallo de las plantas de kale, hubo diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos; las plantas regadas con SN a $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ de CE fueron las que mayor diámetro de tallo presentaron (13.848 mm) fueron similares estadísticamente a aquellas que fueron regadas con $1.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ de CE de la SN (12.638 mm), por lo que hubo un aumento del 75% y 59% respectivamente con respecto a las plantas regadas con SN a $0.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ de CE (7.931 mm) (Figura 21). Cruz-Crespo *et al.* (2012) obtuvieron tallos de tomate con mayor diámetro en una SN al 100%, aunque similar estadísticamente con la SN al 50% y 75% y superiores a la de 25%.

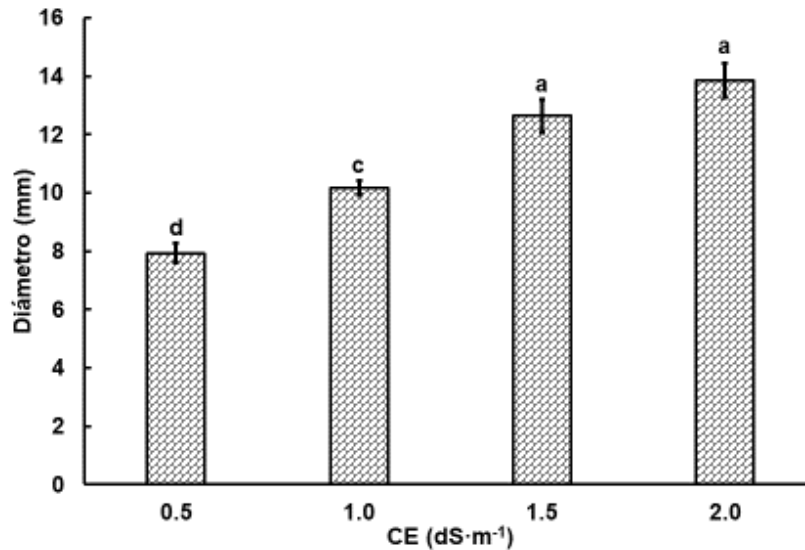


Figura 21. Diámetro de tallo de plantas de kale a los 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.

Resistencia a la penetración

La variable resistencia a la penetración no se comportó de acuerdo con una distribución normal, por lo que se analizó con la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis. En dicha prueba, no se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en los distintos tratamientos (Cuadro 21), los tallos de kale de los cuatro tratamientos presentaron una resistencia similar a la penetración. Scuderi *et al.* (2009) en lechuga detectaron valores similares en la firmeza (g) del cultivo variando la CE de la SN (2.8, 3.8 y 4.8 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$), tal como se presenta en ésta investigación. El calcio al tener funciones estructurales, está ligado a la estabilidad de las membranas e integridad celular (Marschner, 2012), y al presentarse concentraciones similares de Ca en el extracto celular de peciolo a diferentes CE (excepto a una CE de 1.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$), podría asociarse la firmeza (resistencia a la penetración, kg) a la concentración de Ca, y explicar que no existe diferencia a la oposición de penetración en los tallos del kale, tal como se presentan los resultados de ésta investigación. Por otra parte, los resultados son expresados en kg, de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-FF-058-SCFI-2006 que hace mención a la determinación de resistencia a la penetración en frutas frescas, y la oposición que presenta el fruto a la introducción del émbolo del penetrómetro, con lo

que permite decir que los tallos de kale, presentaron una oposición semejante debido a la concentración de Ca en ECP (concentraciones similares).

Cuadro 21. Resistencia a la penetración en plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	Resistencia a la penetración (kg)
0.5	1.500±0.0706
1.0	1.464±0.0457
1.5	1.572±0.0631
2.0	1.557±0.0742
Chi cuadrada	1.5604
pχ ²	0.6684
Significancia	**

Media ± error estándar **pχ²≤0.05 indica significancia estadística.

Peso seco de tallo, hoja y raíz

En el ANDEVA se detectó que el peso seco de tallo, hoja y raíz de las plantas de kale tuvieron diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos (Cuadro 22), con el mismo comportamiento, a medida que aumentó la CE de la SN aumentaron los pesos secos de las tres fracciones de la planta. La CE de 2.0 dS·m⁻¹ promovió un mayor peso seco de tallo, hoja y raíz (4.2315, 22.0881 y 5.7258 g respectivamente) con un aumento del 214, 239 y 166% respecto a los valores a una CE de 0.5 dS·m⁻¹ (1.3472, 6.5135 y 2.1508 g respectivamente). Por otra parte, el peso total de la parte aérea (tallo + hoja) tuvo un aumento del 235% comparando las plantas tratadas con ambas CE (26.3196 g a 2.0 dS·m⁻¹ y 7.8607 g a 0.5 dS·m⁻¹). De acuerdo con Huang *et al.* (2010), al aumentar la concentración de nutrientes aumentaba el peso seco las plantas de col china, por su parte Ding *et al.* (2018) en el cultivo de pak choi observaron un efecto directo entre el aumento de la CE y el aumento de peso seco del cultivo, con un ligero decremento a una CE muy alta (9.6 dS·m⁻¹), lo que significa que el suministro de nutrientes tiene efecto en el desarrollo de las plantas, al igual que las condiciones ambientales (Signore *et al.*, 2016).

Cuadro 22. Peso seco de tallo, peso seco de hoja y peso seco de raíz en plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	Peso seco de tallo	Peso seco de hoja (g)	Peso seco de raíz
0.5	1.3472±0.0572 d	6.5135±0.306 d	2.1508±0.1417 c
1.0	2.6158±0.1072 c	13.0732±0.235 c	3.9770±0.1650 b
1.5	3.7502±0.1009 b	18.9541±0.277 b	4.4042±0.2255 b
2.0	4.2315±0.1538 a	22.0881±0.366 a	5.7258±0.2079 a
R ²	0.919	0.978	0.837
CV (%)	11.673	6.257	14.627
DHS	0.420	1.142	0.716

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Volumen y longitud radical

Las raíces del kale, tanto en su volumen como su longitud tuvieron diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos (Cuadro 23), el volumen tuvo un comportamiento directamente proporcional al aumento o disminución de la CE de la SN, a mayor CE mayor volumen radical (76.8 cm³ a 2.0 dS·m⁻¹) con un aumento del 122% respecto al menor volumen (34.6 cm³) a 0.5 dS·m⁻¹ de CE. La longitud radical fue mayor en aquellas plantas regadas a una CE de 1.5 dS·m⁻¹ (53.4 cm) con un aumento del 36% respecto a la longitud de raíces de menor tamaño y tratadas a 0.5 dS·m⁻¹ (39.7 cm). Schwarz (2004) en su revisión, hace mención que, a CE altas se reduce el crecimiento de las raíces, por ejemplo, se ha observado una reducción de la longitud radical al aumentar la CE, también relacionado a un contenido menor de agua en el medio de cultivo.

Cuadro 23. Volumen radical y longitud radical en plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m⁻¹)	Volumen radical (cm³)	Longitud radical (cm)
0.5	34.600±2.2071 c	39.700±1.0858 b
1.0	62.000±3.7059 b	43.700±2.4588 b
1.5	64.900±3.1107 b	53.400±1.7901 a
2.0	76.800±2.6575 a	45.900±1.0899 b
R ²	0.750	0.487
CV (%)	15.778	11.799
DHS	11.322	6.491

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Hojas comerciales de plantas de kale

Las hojas comerciales tomadas en cuenta fueron aquellas que medían entre 10-20 cm. de longitud, las cuales tuvieron diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos tanto en el peso fresco comercial como en la longitud y ancho de sus hojas comerciales (Cuadro 24), pudiendo observar el mismo comportamiento en las tres variables, esto es, a medida que la CE de la SN fue mayor, mayor fue el peso fresco comercial, la longitud y el ancho de las hojas comerciales.

Las plantas regadas con SN a 2.0 dS·m⁻¹ de CE tuvieron un peso fresco de 184.049 g por el total de hojas comerciales, con un aumento del 361% con respecto a aquellas plantas regadas con una SN a 0.5 dS·m⁻¹ de CE (39.907 g por el total de hojas comerciales).

La longitud de las hojas comerciales de plantas regadas con una SN a 2.0 dS·m⁻¹ de CE tuvieron una mayor longitud promedio de sus hojas (17.79 cm) con un aumento del 56% respecto a aquellas plantas regadas a 0.5 dS·m⁻¹ de CE de la SN (11.44 cm).

El ancho de las hojas comerciales de plantas regadas a una CE de $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de la SN presentaron el valor más alto (11.1 cm) en comparación con el ancho de las hojas regadas a $0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE de la SN (7.37 cm) hubo un aumento del 51%.

De tal manera, que las plantas regadas con una SN a $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE tuvieron mayor longitud y ancho, lo que representa un mayor peso fresco de hojas comerciales.

A medida que la CE de la SN fue mayor, incrementó el porcentaje de peso fresco comercial obtenido del peso fresco total. Para el caso de las plantas regadas con la SN a $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE fue del 88%, a $1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE del 84%, a $1.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE del 82% y a $0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE del 69%, obteniendo de esta manera que las plantas regadas con una SN a $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE producen mayor peso fresco comercial.

D'Anna *et al.* (2003), trabajando con fresa, concluyeron que el porcentaje de la fresa no comerciable aumentaba a medida que la CE aumenta, es decir, a CE altas hay menor producto comercializable, comparando un poco con la producción de hojas del kale, contrasta, ya que a una CE de $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ hay más producto comercializable.

Las hojas comerciales de kale tienen longitudes entre 10 y 20 cm. y mientras estén en ese intervalo tenderán a ser hojas más anchas, lo que resulta en un mayor peso y en conjunto un mayor número de hojas comerciales, y mayor productividad, ante esta situación se ha demostrado en cultivos como pak choi, que una CE alta (4.8) influye de manera positiva a obtener hojas más grandes (Ding *et al.*, 2018). El momento de la cosecha es importante para obtener mayor número de hojas comerciales y de mayor peso, el cultivo de kale a 102 ddt tuvo pesos de hasta 31 g y longitudes de hasta 21.9 cm, lo que resulta que a CE de $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ en el kale de la presente investigación se tienen longitudes promedio de hasta 17.794 cm a 54 ddt (Balkaya y Yanmaz, 2005).

Cuadro 24. Determinaciones en hojas comerciales en plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	PFHC (g)	NHC	LHC (cm)	AHC (cm)
0.5	39.907±3.9263 d	8.900±0.6403 c	11.543±0.2436 d	7.376±0.1306 d
1.0	91.601±2.5060 c	12.800±0.4163 b	14.564±0.4902 c	9.088±0.1957 c
1.5	140.498±2.2116 b	14.900±0.4819 a	16.357±0.3881 b	9.945±0.2885 b
2.0	184.049±3.8156 a	15.000±0.4472 a	17.794±0.3101 a	11.090±0.2058 a
R ²	0.969	0.728	0.816	0.819
CV (%)	8.896	12.352	7.758	7.174
DHS	12.216	1.919	1.408	0.810

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. PFHC = Peso fresco de hojas comerciales, NHC = Número de hojas comerciales, LHC = Longitud de hojas comerciales y AHC = Ancho de hojas comerciales. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

5.1.2.2 Variable de producción

El rendimiento por superficie está condicionado por el tamaño de hojas listas para comercializar, tanto de su longitud, ancho y peso, así como el número de las mismas para obtener mayor producción. Cultivos como la menta (Juárez-Rosete *et al.*, 2014) tienen una relación directa entre el aumento de la CE y pesos frescos mayores, lo que implica un mayor rendimiento. También Ding *et al.* (2018) a CE mayores (4.8 dS·m⁻¹) obtuvieron pesos frescos mayores en pak choi.

De acuerdo al SIAP (2020), los rendimientos de kale en México son de aproximadamente 16.46 Mg·ha⁻¹, menores a las obtenidas en la presente investigación, ya que el momento de la cosecha fue a los 54 ddt, reduciendo así su crecimiento, puesto que Balkaya y Yanmaz (2005) han repostado cosechas hasta los 102 ddt en variedades tempranas. El rendimiento mayor se presentó en las plantas regadas con una CE de 2.0 dS·m⁻¹ (4.969 Mg·ha⁻¹) como se observa en el cuadro 25, las cuales fueron las que presentaron la mayor longitud de hojas, el ancho de hoja mayor, así como un peso promedio mayor de las hojas y un número mayor de hojas comerciales.

Cuadro 25. Rendimiento comercial de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	Rendimiento (Mg·ha ⁻¹)
0.5	1.077±0.1061 d
1.0	2.473±0.0677 c
1.5	3.793±0.0597 b
2.0	4.969±0.1030 a
R ²	0.969
CV (%)	8.897
DHS	0.330

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

5.1.2.3 Concentración nutrimental

Macronutrientes

En la concentración de N en plantas de Kale se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos como se observa en el Cuadro 26, en donde las plantas regadas con una SN a 2.0 dS·m⁻¹ de CE fueron las que mayor concentración del elemento tuvieron (42.523 g·kg⁻¹) con un aumento del 30% con respecto a la concentración de N en aquellas plantas regadas con una SN a 0.5 dS·m⁻¹ de CE (32.733 g·kg⁻¹). A medida que la CE de la SN disminuyó también disminuyó la concentración de N en las plantas. De acuerdo con Yost (2021) en el cultivo de kale, la concentración de N aumentó proporcionalmente al aumento de la CE de 5.58 a 6.38%, por su parte López-Ordaz *et al.* (2011) no identificaron diferencias en la concentración del elemento en cultivo de mango. Samarakoon *et al.* (2019) en cultivo de lechuga y Huang *et al.* (2010) en col china observaron el mismo comportamiento que en el presente trabajo, a mayor CE de la solución mayor concentración de N en tejido vegetal.

La concentración de K y Mg en las plantas de kale no tuvieron diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos (Cuadro 26 y 27), a pesar de que numéricamente, las plantas regadas con una CE de $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ tuvieron una mayor concentración de K y Mg ($16.147 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $5.810 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente) con respecto a las otras plantas de los tres tratamientos. De acuerdo con Yost (2021) en cultivo de kale, la concentración de K aumentó (de 3.82 a 5.30%) al aumentar la CE de 0.5 a $5.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, en tanto la concentración de Mg disminuyó (de 0.67 a 0.52%) al aumentar la CE, es decir tiene un efecto negativo en la concentración del elemento.

La concentración de P y S en las plantas de kale tuvieron diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos, siendo aquellas plantas regadas con una SN a $0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE las que mayor concentración de los elemento tuvieron ($2.8767 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $17.177 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente) (Cuadro 26 y 27), teniendo una disminución en la concentración en un 18% para el caso del P en las plantas tratadas con SN a $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de CE ($2.3700 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y para el caso del S una disminución del 27% en su concentración en plantas regadas a una CE de $1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Juárez-Rosete *et al.* (2019) reportan en orégano, que SN al 100% y 125% aportan mayor concentración al cultivo en varias fechas de cosecha, y en el cultivo de kale, Yost (2021) la concentración de P no tuvo efecto a la variación de CE, pero el S si tuvo un aumento (de 0.31 a 1.34%) al aumentar la CE de 0.5 a $5.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Los datos de concentración de Ca en las plantas de kale no tuvieron una distribución normal, por lo que se tomó la decisión de analizarlos mediante la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, encontrando de esta manera que no existe diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos (Cuadro 28), con este tipo de pruebas se aprecia que las plantas de kale de los cuatro tratamientos tienen valores similares en cuanto a su concentración, por tanto, la CE de la SN no repercute en la concentración de Ca en este cultivo, Cruz-Crespo *et al.* (2014) en la determinación de Ca en chile serrano también identificaron las concentraciones más altas en plantas a la que se les suministró solución nutritiva a 75%. Que equivale a una CE de $1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Yost (2021) en kale, encontró una relación inversa en la concentración de Ca y la CE, mientras una aumenta la otra disminuye y viceversa. En ECP el Ca^{2+} , tuvo una mayor concentración a una CE de $1.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, dicho comportamiento no se vio reflejado en el tejido vegetal, ya que no hay diferencias de la concentración en función de la CE, aunque si existe un promedio mayor del elemento a esa CE.

Cuadro 26. Concentración de N, P y K en parte aérea de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	N	P	K
	g·kg ⁻¹		
0.5	32.773±0.5379 c	2.877±0.0433 a	14.090±1.0755 a
1.0	33.127±1.2211 bc	2.740±0.1153 ab	13.200±0.7559 a
1.5	36.530±0.6529 b	2.610±0.1050 ab	13.777±0.6438 a
2.0	42.523±0.6230 a	2.377±0.0203 b	16.147±0.8949 a
R ²	0.922	0.718	0.456
CV (%)	3.849	5.330	10.387
DMS	3.648	0.370	3.885

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. N = Nitrógeno, P= Fósforo y K = Potasio. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey

Cuadro 27. Concentración de Mg y S en parte aérea de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	Mg	S
	g·kg ⁻¹	
0.5	5.550±0.0907 a	17.177±0.6625 a
1.0	5.447±0.2933 a	14.100±0.6543 b
1.5	5.610±0.2248 a	12.533±0.5833 b
2.0	5.810±0.1308 a	13.050±0.6274 b
R ²	0.178	0.802
CV (%)	6.217	7.708
DMS	0.911	2.865

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. Mg = Magnesio y S = Azufre. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Cuadro 28. Concentración de calcio (Ca) en plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	Ca (g·kg ⁻¹)
0.5	17.073± 0.4359
1.0	18.597± 0.9467
1.5	17.813± 1.0495
2.0	13.950± 0.6222
Chi cuadrada	7.2051
p-value	0.0656
Significancia	ns

Media ± error estándar ** Un p≤0.05 indica significancia estadística, ns= No hay significancia

Mills y Jones (1996) explicaron que los intervalos de concentración de macronutrientes son: N (3.10-5.50%), P (0.30-0.70%), K (2.00-4.00%), Ca (1.30-2.50%), Mg (0.25-0.70%) y S (No dato). Las concentraciones de estos elementos en la presente investigación se encuentran: N, Ca y Mg, todos los tratamientos (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 dS·m⁻¹) dentro de los rangos, en tanto que el P y K en todos los tratamientos están por debajo de los intervalos.

Nitratos

La concentración de NO₃⁻ en tejido vegetal de kale no presentaron normalidad de sus datos, lo que implicó hacer la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, de acuerdo al (p≤0.05) (Cuadro 29) existen diferencias significativas, observando que a medida que aumenta la CE de la SN aumenta la concentración de NO₃⁻ en el cultivo de kale. Los valores rondan entre 0.563 y 4.490% de nitratos en CE de 0.5 a 2.0 dS·m⁻¹. El kale es de la familia del brócoli (Brassicas), y de acuerdo a Valencia *et al.* (2015), en cultivo de brócoli, se encontraron contenidos de NO₃⁻ desde 521.4 hasta 5638.2 mg NO₃⁻·kg⁻¹, y comparando con los contenidos de kale expresados en mg·kg⁻¹ (haciendo conversión de unidades) tenemos que el contenido de nitratos a 0.5 dS·m⁻¹ está dentro de los límites propuestos, los demás tratamientos (1.0, 1.5 y 2.0 dS·m⁻¹) produjeron contenidos más altos que los de Valencia. Por otra parte, en cultivo de kale, Correia *et al.* (2010), encontraron concentraciones

mínimas de 41 y máximas de 1319 mg NO₃⁻·kg⁻¹, de igual forma los valores del presente trabajo son mayores y de acuerdo con el Reglamento (UE) No 1258/2011 del Diario Oficial de la Unión Europea, en algunos cultivos de hojas están permitidos niveles máximos de hasta 5000 mg NO₃⁻·g⁻¹, lo cual son inferiores a los obtenidos en kale en Montecillo.

Cuadro 29. Concentración de nitratos (NO₃⁻) en plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	NO ₃ ⁻ (%)
0.5	0.563±0.0947
1.0	0.999±0.1093
1.5	2.200±0.4726
2.0	4.490±0.1637
Chi cuadrada	10.458
pχ ²	0.0151
Significancia	**

Media ± error estándar **pχ²≤0.05 indica significancia estadística.

Micronutrientes

Las concentraciones de Fe y Cu en plantas de kale tuvieron diferencias estadísticamente significativas (p≤0.05) por efecto de los tratamientos y un comportamiento similar entre sí (Cuadro 30), puesto que a una CE de 1.0 dS·m⁻¹ de la SN, las plantas tuvieron una mayor concentración de Fe y Cu (170.477 mg·kg⁻¹ y 16.865 mg·kg⁻¹ respectivamente) y un aumento de dicha concentración del 8% en el caso del Fe (157.916 mg·kg⁻¹) y del 58% para el Cu (10.685 mg·kg⁻¹) con respecto a las plantas regadas con SN a 0.5 dS·m⁻¹

La concentración de Zn en las plantas de kale no tuvo diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos, aunque numéricamente las plantas regadas con SN a 1.0 dS·m⁻¹ de CE fueron las que tuvieron una concentración mayor de dicho elemento (28.230 mg·kg⁻¹). De igual

manera se observa que en la concentración de B en las plantas de kale no tuvo diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos, puesto que estadísticamente todos los valores son similares, aunque numéricamente las plantas regadas con SN a $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ de CE tienen una mayor concentración ($51.980 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) que el resto de las plantas de los otros tres tratamientos, siendo aquellas plantas tratadas con una SN a $0.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ de CE las de menor concentración de B ($45.073 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) y que de la misma manera Magdaleno-Villar *et al.* (2006) reportan que el B es mayor su concentración en SN al 100% ($63.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

La concentración de Mn en plantas de kale fue mayor en los tratamientos con SN a $0.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ y $1.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ de CE (valores similares entre sí), con concentraciones de $71.869 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ y $70.060 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectivamente, y el tratamiento con SN, a $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ fue el que menor concentración en la planta tuvo con un valor de $56.374 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ como se aprecia en el Cuadro 21, esto contrasta con lo reportado por Magdaleno-Villar *et al.* (2006) en donde una SN al 100% le aporta mayor concentración de Mn ($42.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), a pesar de que nuestro valores son mayores que ese dato, la tendencia nos afirma que la SN al 100% es la que menor concentración del elemento aporta.

En el cultivo de kale regados a diferentes CE los micronutrientes se comportaron de la siguiente manera: Zn y Cu aumentaron su concentración (de 49.2 a $196.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ y de 5.4 a $16.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectivamente) al aumentar la CE de 0.5 a $5.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, en el presente trabajo la concentración de Zn no se vio afectado por los niveles de CE, en tanto el Cu tuvo su mayor concentración a $1.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, la razón de los comportamientos pudo deberse a una variación del pH de las soluciones, ya que se ajustaba dos veces por semana y en esos lapsos de tiempo pudo haber diferido las concentraciones. El Mn aumento al aumentar la CE de 210.6 a $303.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ y el Fe y el B tuvieron efecto por los niveles de CE, misma tendencia del presente trabajo en B, no hubo diferencias por efecto de la CE, no así con Fe, teniendo a $1.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ la mayor concentración (Yost, 2021)

De acuerdo con Mills y Jones (1996) las concentraciones de micronutrientes en kale son: Fe (60-300 ppm), Mn (30-250 ppm), B (30-100 ppm), Cu (4-25), Zn (30-250 ppm) y Mo (0.10-0.15 ppm), y comparando con las obtenidas en el presente trabajo tenemos que el Fe, Mn, B, Cu se localizan dentro del intervalo de los cuatro tratamientos (0.5 , 1.0 , 1.5 y $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$), en tanto el Mo está por encima de los intervalos recomendados y el Zn en los tratamientos 0.5 , 1.5 y $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ está por debajo de los mismos, solo a $1.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ se encuentra dentro de dicho intervalo.

Cuadro 30. Concentración de Fe, Cu, Zn y Mn en parte aérea de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	Fe	Cu	Zn	Mn
	mg·kg ⁻¹			
0.5	157.916±3.7080 b	10.685±0.2078 b	28.230±2.1582 a	71.869±4.5163 a
1.0	170.477±1.4803 a	16.865±1.3291 a	31.180±1.9529 a	67.451±2.0243 ab
1.5	168.035±1.7996 ab	11.476±0.8337 b	28.883±2.3964 a	70.060±1.9447 a
2.0	163.940±2.9468 ab	11.454±1.2663 b	27.546±2.3487 a	56.374±1.3924 b
R ²	0.619	0.748	0.159	0.706
CV (%)	2.769	13.909	13.283	7.165
DHS	11.953	4.590	10.058	12.447

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. Fe = Hierro, Cu = Cobre, Zn = Zinc y Mn = Manganeseo, R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Cuadro 31. Concentración de B y Mo en parte aérea de plantas de kale a 54 ddt regadas con solución Steiner a diferentes conductividades eléctricas (CE) y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

CE (dS·m ⁻¹)	B	Mo
	mg·kg ⁻¹	
0.5	45.073±0.9586 a	4.7107±0.1783 a
1.0	47.571±2.0300 a	4.6713±0.1901 a
1.5	47.655±3.16768 a	4.3323±0.6002 a
2.0	51.980±3.57515 a	5.3093±0.0619 a
R ²	0.494	0.364205
CV (%)	6.413	11.96806
DHS	8.060	1.4883

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. B = Boro y Mo = Molibdeno. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

5.2 Experimento 2. Relación nitrato/amonio de la solución nutritiva Steiner en plantas de pak choi y kale

5.2.1 Pak choi

5.2.1.1 Variables de desarrollo

Lecturas SPAD

Las lecturas SPAD del cultivo de pak choi mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos en dos fechas de muestreo. En ambas fechas (28 y 52 ddt) se obtuvo una menor lectura SPAD en hojas regadas con la relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ 75/25 (52.371 y 63.036 respectivamente), en tanto, a 28 ddt las plantas regadas a 50/50 y 25/75 fueron similares entre sí (56.171 y 56.379) y a los 52 ddt presentaron valores cercanos (64.429 y 64.714), lo que indica, que contenidos de NH_4^+ mayores a 50% en la SN promovieron una mayor intensidad de verdor en las hojas de pak choi tanto a mitad de ciclo del cultivo como al final (Figura 22).

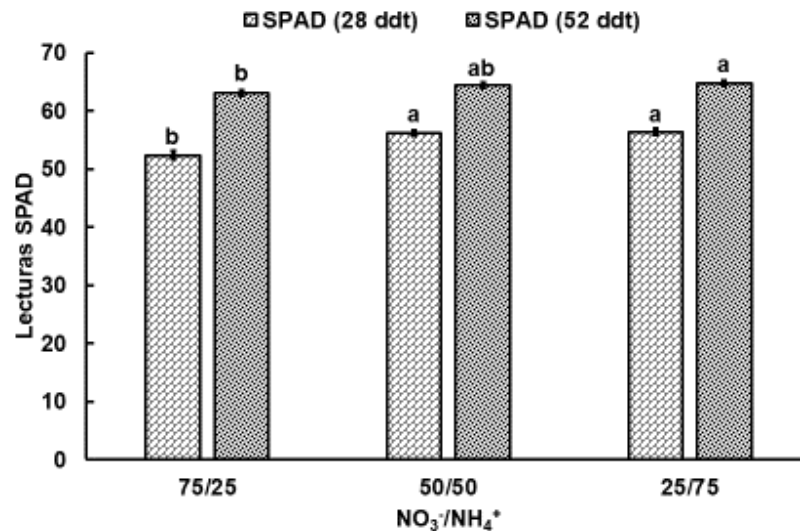


Figura 22. Lecturas SPAD de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra para un mismo muestreo son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.

En el cultivo de espinacas, Conesa *et al.* (2009), obtienen que a relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ 75/25, 50/50 y 25/75 obtienen mayores lecturas SPAD que en una relación 100/0, haciéndose notar el efecto del amonio en el verdor de las hojas del cultivo, además los tres tratamientos anteriores en espinaca fueron estadísticamente similares, pero con un legro aumento de la lectura a una relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ de 25/75 con un valor de 46.9. En el cultivo de lechuga no se observó un efecto en las lecturas por acción de la aplicación de amonio en la solución, por su parte Frerichs *et al.* (2019) observaron un verde más intenso en la albahaca cuando se aplicó NH_4^+ a la solución.

Ca^{2+} , K^+ y NO_3^- en ECP

La concentración de Ca en el extracto celular de pecíolo no se comportó de acuerdo a la distribución normal con la prueba de Shapiro-Wilk, por lo tanto, se analizaron mediante la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis (Cuadro 32), y se observa que no hubo diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre tratamientos, es decir, la forma de N (NO_3^- o NH_4^+) en la SN regadas en las plantas no tuvo efecto en la concentración de Ca del extracto celular de pecíolo, presentado valores de 71.92, 70.07 y 72.85 ppm en los tres tratamientos (75/25, 50/50 y 25/75 respectivamente), esta tendencia se observó en lechuga, a cuatro relaciones de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ 100/0, 80/20, 65/35 y 50/50 y de igual forma no se observó diferencias por efecto de las forma de N en la concentración de Ca^{2+} en ECP (Lara-Izaguirre *et al.*, 2019), otros estudios si han detectado el efecto de un porcentaje de NH_4^+ a la concentración de Ca^{2+} en las hojas (Hernández-Pérez *et al.*, 2015).

La concentración de NO_3^- en ECP tuvo diferencias por efecto de los tratamientos, la relación 25/75 tuvo una mayor concentración (1614.29 ppm) en relación con los otros dos tratamientos (Figura 23), al igual que la concentración de K, a mayor porcentaje de NH_4^+ mayor concentración del elemento (3064.29 ppm). Los NO_3^- en ECP en el cultivo de lechuga tuvieron diferencias por efecto de las relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, con reducciones en las concentraciones de NO_3^- en la medida que existe un porcentaje significativo de NH_4^+ (35 y 50%), es decir, se reduce el contenido en un 15% respecto aquellas plantas con una solución donde hay mayor porcentaje de NO_3^- (100 y 80%) (Lara-Izaguirre *et al.*, 2019), de igual manera Urlic *et al.* (2017) explicaron que suministrando NH_4^+ a la solución de riego de lechugas en niveles altos se reduce la concentración de NO_3^- en las hojas del cultivo. De acuerdo con el Reglamento (UE) No 1258/2011, el contenido de NO_3^- en

cultivos como la lechuga se permiten niveles máximos de hasta 5000 mg NO₃⁻·kg⁻¹, en cultivos como la arúgula hasta 7000 mg NO₃⁻·kg⁻¹ y niveles máximos de 3500 mg NO₃⁻·kg⁻¹ en espinacas. Con lo anterior podemos definir que las concentraciones en el cultivo de pak choi están dentro de los niveles permitidos de contenido de NO₃⁻, con valores máximos de 3064.29 ppm a mayor porcentaje de NH₄⁺ en la solución (25/75).

La concentración de K⁺ presentó diferencias por efecto de la relación NO₃⁻/NH₄⁺, esto es, a medida que se aumentó el NH₄⁺ en la solución Steiner, fue mayor la concentración del elemento en ECP con un valor de 3064 mg·kg⁻¹, y una menor concentración de K⁺ (2143 mg·kg⁻¹) en las plantas regadas con SN a una relación NO₃⁻/NH₄⁺ 75/25. Autores han encontrado antagonismo en la concentración de K⁺ ante el suministro de NH₄⁺, Azarmi y Esmailpour (2010) en pepino observaron una disminución del elemento a mayor contenido de amonio y Kotsiras *et al.* (2002) distinguieron una disminución de K⁺ al aumentar el amonio.

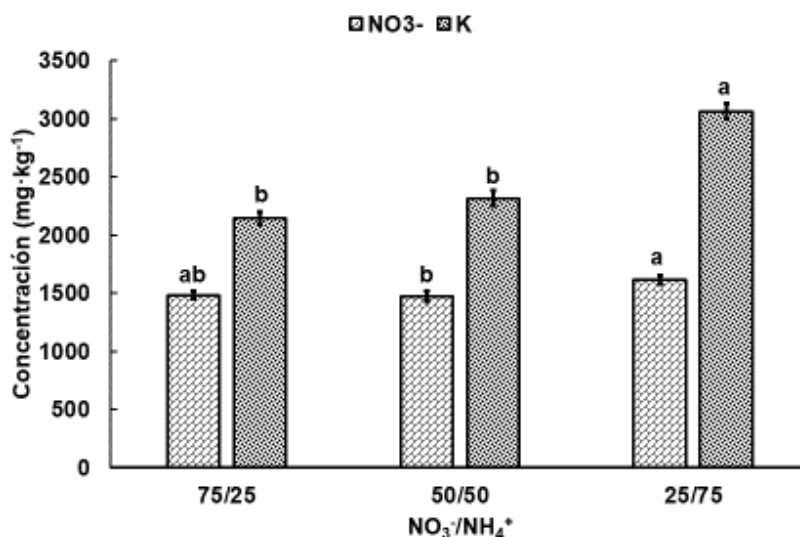


Figura 23. Concentración de nitratos (NO₃⁻) y potasio (K⁺) en ECP de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones NO₃⁻/NH₄⁺ y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra para cada nutriente son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05). En la gráfica se indica el error estándar.

Cuadro 32. Concentración de calcio (Ca²⁺) en ECP de plantas de pak choi a 51 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones nitrato/amonio y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺	Ca ²⁺ (mg·kg ⁻¹)
75/25	71.9286±1.6722
50/50	70.0714±1.2687
25/75	72.8571±2.6413
Chi cuadrada	1.5604
pχ ²	0.6684
Significancia	ns

Media ± error estándar **pχ²≤0.05 indica significancia estadística. pχ²≥0.05 indica no significancia estadística.

Peso fresco, área foliar, diámetro de tallo y resistencia a la penetración

Las variables del Cuadro 33 tuvieron diferencias estadísticas significativas por efecto de los tratamientos. El peso fresco de las plantas de pak choi se vio afectado por la relación de NO₃⁻/NH₄⁺, a una relación 75/25 y 50/50 tuvieron los máximos pesos (581.71 y 576.14 g respectivamente), en tanto, a mayor porcentaje de NH₄⁺ (75%) en la solución de riego, las plantas redujeron su peso fresco a 401.14 g.

El área foliar presentó la misma tendencia que el peso fresco, a una relación de 75/25 y 50/50, se obtuvieron una mayor área foliar (3399.14 y 3421.60 cm² respectivamente) de las plantas, y afectó el crecimiento cuando se aplicó mayor porcentaje de NH₄⁺ (2513.350 cm²), obteniendo hojas más pequeñas.

El diámetro de tallo de las plantas en los tres tratamientos se vio influido por la relación NO₃⁻/NH₄⁺, a 75/25 y 50/50 se formaron tallos más gruesos (20.81 y 21.35 mm) en comparación con los tallos de las plantas regadas con una SN 25/75, observando el efecto de un porcentaje mayor de amonio en la disminución del diámetro (19.29 mm).

La resistencia a la penetración fue diferente, los tallos del pak choi regados a 75/25 y 50/50 se comportaron de manera similares presentando mayor resistencia (4.55 y 4.39 kg respectivamente) respecto aquellos tratados con 25/75 (3.96 kg).

En general, las plantas de pak choi en los tres tratamientos se vieron afectados por la relación de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ en su desarrollo, una relación 25/75 afectó el peso fresco, el área foliar, el diámetro de tallo y la resistencia a la penetración.

La adición 50% de NH_4^+ a la solución no generó diferencias en las variables del pak choi comparado con un suministro menor de NH_4^+ (25%), en el caso de González *et al.* (2009) en albahaca no se presentó diferencias significativas por diferentes relaciones de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, a pesar de que se obtuvo mayor biomasa promedio cuando se añadió 40% de NH_4^+ a la solución, de la misma forma no se observó diferencias en área foliar en función de las relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ (100/0, 75/25, 50/50 y 25/75) en el cultivo de espinacas (Conesa *et al.*, 2009), lo que sugiere que las espinacas son tolerantes a la adición alta de NH_4^+ , mientras que el pak choi sí ve reducido tanto su peso fresco como el área foliar a porcentajes altos (75%). Lara-Izaguirre *et al.* (2019) en cultivo de lechuga observaron una mayor área foliar al suministro 100% de NO_3^- a la solución, y mientras aumenta el porcentaje de NH_4^+ disminuye el área foliar hasta un 36% (50% de NH_4^+). El diámetro de tallo en cultivo de chile habanero no presentó alguna diferencia por efecto de diversas relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ (30% de NH_4^+). Salsac *et al.* (1987) explicaron que el amonio puede ser tóxico para el desarrollo de las plantas, por lo que sugieren usar cantidades pequeñas en cultivos hidropónicos, por tanto, al tener una relación 25/75 (75% NH_4^+) podría estar afectado el diámetro de tallo del pak choi al tener el menor diámetro de tallo (19.29 mm). En cultivo de tomate también se ha observado un efecto en la relación al suministro de las formas de N, Rivera-Espejel *et al.* (2014) detectaron que los tallos de tomate redujeron su diámetro por la adición de más cantidad de NH_4^+ (6 meq. L^{-1}) en comparación con un suministro menor (3 meq. L^{-1}), lo que afectó el desarrollo.

Cuadro 33. Peso fresco (PF), Área foliar (AF), Diámetro de tallo (DT) y resistencia a la penetración (RP) en plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	PF (g)	AF (cm^2)	DT (mm)	RP (kg)
75/25	581.71±11.9782 a	3399.14±75.1353 a	20.81±0.4000 a	4.55±0.1778 a
50/50	576.14±9.8516 a	3421.60±57.6019 a	21.35±0.2627 a	4.39±0.1048 ab
25/75	401.14±9.9796 b	2513.50±61.0946 b	19.29±0.3165 b	3.96±0.1514 b
R^2	0.827	0.765	0.350	0.177
CV (%)	7.666	7.823	6.051	12.859
DHS	36.686	224.14	1.141	0.509

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. R^2 = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta significativa.

Peso seco de tallo, hoja y raíz y volumen y longitud radical

El peso seco de la hoja, volumen y longitud radical no tuvieron una distribución normal de datos, por lo que se hizo la prueba paramétrica de Kruskal-Wallis (Cuadro 34). Se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) por el efecto de los tratamientos, en el caso del PSH y VR., en tanto el peso seco de tallo y raíz, tuvieron efecto debido a los tratamientos (Cuadro 35) con diferencias estadísticamente significativas (comparación de medias de Tukey).

El peso seco de hoja se vio afectado negativamente por el riego de las plantas a mayor porcentaje de NH_4^+ (25/75) con un peso promedio de 14.7725 g, en tanto, una relación 75/25 promovió mayor PSH (17.2928 g).

El peso seco de tallo, se vio afectado por la adición de porcentajes mayores de NH_4^+ , a 25/75 se presentó el peso más bajo (12.6799 g) y a una relación 75/25 un peso mayor (19.9790 g).

En el peso seco de raíz, a medida que aumentó el porcentaje el NH_4^+ en la solución, disminuyó el peso de las plantas, pasando de 4.6567 g a 2.4006 g (de 75/25 a 25/75), de la misma manera la SN afectó el volumen radical, a mayor porcentaje de NO_3^- mayor volumen radical (55 cm^3) y a mayor porcentaje de NH_4^+ menor volumen de la raíz (36.1429 cm^3), la longitud radical no presentó

diferencias significativas entre tratamientos, por tanto, el peso seco de la raíz se vio afectado por el volumen, más que por la longitud, obteniendo raíces más voluminosas en las plantas tratadas con una relación 75/25. y a porcentajes altos de amonio, hubo menor producción de raíces.

Rivera-Espejel *et al.* (2014), en cultivo de tomate encontraron un efecto en el volumen radical por el suministro de NH_4^+ , a mayor contenido de NH_4^+ en la solución, menor volumen (mL), pero la longitud de la raíz no se vio influida por el NH_4^+ , aunque en cualquier relación si fueron superiores a las raíces tratadas con agua, en lechuga Lara-Izaguirre *et al.* (2019) observaron un efecto negativo en el peso seco de la raíz, mientras que mayor fue el porcentaje de NH_4^+ , menor fue el peso seco de la raíz, una probable explicación es que el NH_4^+ puede inhibir el crecimiento de raíces por la acidificación del medio de desarrollo (Magalhaes y Huber, 1989).

El peso seco de hoja en el cultivo de lechuga tuvo un efecto negativo a la adición de NH_4^+ , a mayor porcentaje de la forma de N, menor peso seco de la hoja (Lara-Izaguirre *et al.*, 2019). Además, el NH_4^+ al considerarse tóxico para plantas de la familia de las Brassicaceae, se reduce el crecimiento lo que afecta los pesos secos (Britto y Kronzucker, 2002).

Cuadro 34. Peso seco de hoja (PSH), volumen radical (VR) y longitud radical (LR) en plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	PSH (g)	VR (cm^3)	LR (cm)
75/25	17.2928±0.5049	55.0000±2.0966	30.8929±1.1183
50/50	18.3869±0.3318	46.4286±1.2954	28.5714±0.8318
25/75	14.7725±0.3434	36.1429±1.1619	29.7143±0.5286
Chi cuadrada	20.6056	28.9300	4.4478
$p\chi^2$	<.0001	<.0001	0.1082
Significancia	**	**	ns

Media ± error estándar ** $p\chi^2 \leq 0.05$ indica significancia estadística. $p\chi^2 \geq 0.05$ indica no significancia estadística

Cuadro 35. Peso seco de raíz (PSR) y peso seco de tallo (PST) en plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones NO₃⁻/NH₄⁺ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺)	PSR	PST
	g	
75/25	4.6567±0.2250 a	19.9790±0.3026 a
50/50	3.5733±0.1448 b	18.5563±0.2178 b
25/75	2.4006±0.0929 c	12.6799±0.3512 c
R ²	0.709388	0.897758
CV (%)	17.26843	6.481105
DHS	0.5635	1.0188

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta significativa.

5.2.1.2 Variable de producción

La producción de pak choi en maceta con sustrato de perlita en condiciones de invernadero se muestran en el Cuadro 36, se aprecia una disminución del rendimiento a medida que aumenta el porcentaje de NH₄⁺ en la solución (75%). De acuerdo con la distribución del experimento dentro del invernadero, se hizo el cálculo de la densidad (dato obtenido de acuerdo al experimento). Con el tratamiento 75/25 y 50/50 se obtuvo mejores rendimientos (20.360 y 20.165 Mg·ha⁻¹) y a una relación 25/75, se redujo en un 31 y 30% respectivamente. Britto y Kronzucker (2002) afirmaron que los cultivos de la familia Brassicaceae son sensibles al NH₄⁺, lo que condiciona el rendimiento del pak choi a contenidos altos de NH₄⁺. Como se ha observado a relaciones 75/50 y 50/50 las plantas tuvieron un mayor peso fresco, un número de hojas mayor, mayor área foliar, lo que resulta de un mejor rendimiento. Por otra parte, Wang *et al.* (2009) observaron una disminución en la biomasa de espinaca a medida que aumenta el contenido de NH₄⁺ por arriba del 50%, lo que repercute en el rendimiento final del cultivo.

Cuadro 36. Rendimiento de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	Rendimiento ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
75/25	20.360±0.4960 a
50/50	20.165±0.4080 a
25/75	14.040±0.4133 b
R^2	0.827
CV (%)	7.667
DHS	1.284

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) ± error estándar. R^2 = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

5.2.1.3 Concentración nutrimental

Macronutrientes

Los elementos N, P (Cuadro 37) y Mg (Cuadro 38) tuvieron diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos, en tanto K, Ca y S no se vio afectada su concentración por efecto de las relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ en el tejido vegetal del pak choi.

La concentración de N en el tejido vegetal tuvo una relación directa entre un mayor porcentaje de NH_4^+ y el aumento de la concentración de N, es decir a una relación 25/75 fue mayor la concentración ($56.100 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y a 75/25 una menor ($36.366 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), lo que indica que la concentración de N está influenciada por un porcentaje mayor de NH_4^+ . Azarmi y Esmailpour (2010) obtuvieron de igual manera una concentración mayor de N en el cultivo de pepino a una relación 25/75 ($\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$), y a medida que disminuía el NH_4^+ disminuía el N en el tejido vegetal, incluso fue menor la concentración en aquellos cultivos donde no se suministró NH_4^+ . Además, existe una relación directa entre el contenido de clorofila (lecturas SPAD) y la concentración de N, ambos tuvieron valores altos a mayor contenido de NH_4^+ en la solución de riego, de acuerdo a Muchecheti *et al.* (2016) en cultivo de espinaca detectaron una relación lineal entre las lecturas SPAD y la concentración de N en las hojas superiores del cultivo.

La concentración de P en las plantas regadas a una relación 25/75 fue mayor ($5.0291 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y a una relación 75/25 menor ($3.7344 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), es decir, a mayor porcentaje de NH_4^+ , mayor concentración de P; por su parte Azarmi y Esmailpour (2010) no identificaron diferencias en la concentración de P en tejido vegetal de pepino en ninguna de las relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, de acuerdo a Hernández-Pérez *et al.* (2015) encontraron un aumento de P en tejido vegetal de *lisanthus* al aumentar el NH_4^+ en la solución de riego y una concentración muy baja al no adicionar NH_4^+ a la solución, esta tendencia es similar a la concentración de pak choi, mayor concentración del elemento a mayor contenido de NH_4^+ en la solución.

En la concentración de S no se detectaron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) por efecto de tratamientos, aunque se tuvo un ligero incremento en el promedio con un valor de $18.012 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ en aquellas plantas regadas con una relación 25/75, es decir, más contenido de NH_4^+ en la solución promovió un ligero aumento de la concentración de S en el tejido vegetal, de esta manera Fallovo *et al.* (2009) en dos especies *Brassica* (*Brassica rapa L. subsp. nipposinica var. chinoleifera* y *Brassica juncea L.*) observaron concentraciones altas en las plantas cuando se suministró NH_4^+ a la solución (100%).

La concentración de K fue estadísticamente similar en el tejido vegetal de las plantas de pak choi tratadas a diferentes relaciones de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ (72/25, 50/50 y 25/75), es decir, no hubo efecto por la adición de NH_4^+ como fuente de N en la solución. El K vio disminuir su concentración en pepino al aumento e incluso a la simple adición de cualquier porcentaje de NH_4^+ a la solución de riego (Azarmi y Esmailpour, 2010), por otra parte, Kotsiras *et al.* (2002) distinguieron una disminución de la concentración del elemento al aumentar el contenido de NH_4^+ en la solución. Incluso se observó lo mismo que encontraron Azarmi y Esmailpour (2010), fue mayor la concentración de K a suministrar puro NO_3^- a la solución como fuente de N.

En Ca se puede observar la relación existente entre la concentración en ECP y en tejido vegetal, en ambos casos no hubo diferencias por efecto de las relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ en la concentración de los mismos. Tabatabaei *et al.* (2006) detectaron un efecto antagónico entre el suministro de NH_4^+ en la solución de riego y la concentración de Ca en cultivo de fresa, es decir, a mayor porcentaje de NH_4^+ menor concentración de Ca. De igual forma Kotsiras *et al.* (2002) observaron un efecto inverso entre la concentración de Ca en cultivo de pepino y el porcentaje de NH_4^+ en la solución. En cultivo de pepino de igual forma Azarmi y Esmailpour (2010) detectaron a medida que

aumenta el NH_4^+ en la solución, disminuye la concentración de Ca. En la presente investigación no se presentó efecto alguno por la adición en proporciones de una u otra forma de N en la solución.

Tanto en Ca como en K, se observó una ligera disminución en el promedio de la concentración en tejido vegetal a mayor porcentaje de NH_4^+ en la solución, sin ser diferentes estadísticamente.

La concentración de Mg tuvo una relación directa entre mayor porcentaje de NO_3^- y una mayor concentración del elemento ($11.7483 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y a mayor porcentaje de NH_4^+ , menor concentración de Mg en las hojas. Esto concuerda con lo presentado por Azarmi y Esmailpour (2010) en cultivo de pepino, ya que encontraron una relación inversa entre la concentración de Mg en tejido vegetal y el contenido de NH_4^+ en la SN, a mayor NH_4^+ , menor concentración de Mg. En *lisianthus*, Hernández-Pérez *et al.* (2015), observaron una mayor concentración de Mg en hoja a medida que aumentó el NH_4^+ en la solución. Lo cual se esperaba un antagonismo entre NH_4^+ y Mg.

Cuadro 37. Concentración de N, P y K en parte aérea de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$(\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+)$	N	P	K
	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		
75/25	36.366±0.6541 c	3.7344± 0.1135 b	12.585±0.7719 a
50/50	50.462±0.8801 b	3.8129± 0.1450 b	13.188±1.1642 a
25/75	56.100±0.3599 a	5.0291± 0.1032 a	11.719±1.1787 a
R^2	0.975	0.869	0.076
CV (%)	3.127	6.132	18.881
DHS	2.514	0.434	3.981

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) ± error estándar. N = Nitrógeno, P = Fósforo y K = Potasio, R^2 = Coeficiente de determinación, C.V. = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Cuadro 38. Concentración de Ca, Mg y S en parte aérea de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones NO₃⁻/NH₄⁺ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺	Ca	Mg	S
	g·kg ⁻¹		
75/25	11.7483±0.2898 a	7.1785±0.2068 a	15.989±1.1598 a
50/50	10.5456±0.5456 a	6.0808±0.1687 b	15.603±0.5471 a
25/75	10.7161±0.3115 a	5.4294±0.0956 c	18.012±0.6233 a
R²	0.306649	0.829374	0.291645
CV (%)	8.118172	5.875539	11.13256
DHS	1.5072	0.6176	3.1057

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. Ca = Calcio, Mg = Magnesio y S = Azufre, R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

De acuerdo con Mills y Jones (1996), los intervalos de macronutrientes en pak choi son: N (2.39-5.51%), P (0.36-0.80%), K (2.86-5.74%), Ca (1.29-3.21%), Mg (0.19-0.35%) y S (0.41-0.77%). En el caso de N, la concentración del elemento a una relación 75/25 y 50/50 están dentro del intervalo, en tanto a un porcentaje de 75% de NH₄⁺, la concentración sobrepasa el límite superior. En el P, las concentraciones de los tres tratamientos (75/25, 50/50 y 25/75) están dentro de los intervalos. Las concentraciones de Ca y K, ningún tratamiento entra en los intervalos, siendo estos muy inferiores. En el caso del Mg y S, las tres concentraciones son superiores a los intervalos, quedando fuera de sí.

Nitratos

La concentración de NO₃⁻ en tejido vegetal del cultivo de pak choi, tuvo diferencias por efecto de los tratamientos, tal como se observa en cuadro 39, a una relación 25/75 hubo menor concentración de NO₃⁻ en tejido vegetal (2.658%), y a una relación 50/50 y 75/25 un mayor porcentaje de nitratos en pak choi (4.229 y 3.967% respectivamente). Teniendo un efecto favorable en la disminución de nitratos a suministros altos de NH₄⁺ en la solución. Estas tendencias no coinciden con los NO₃⁻ en

el ECP (antes mencionados), ya que a mayor contenido de NH_4^+ en la solución, fue mayor la concentración de NO_3^- .

La tendencia del contenido de NO_3^- en el pak choi coincidió con lo reportado por Xing *et al.* (2015) en espinacas, al suministrar mayor contenido de NH_4^+ a la proporción $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ disminuyó el contenido de NO_3^- en el cultivo. Santamaría (2006) menciona que los cultivos que generalmente acumulan mayor cantidad de nitratos son los de la familia de las Brassicaceae, Chenopodiaceae, Amarantaceae, así como Asteraceae y Apiaceae. Los contenidos presentados en la presente investigación son superiores (valores convertidos a $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) a los límites máximos permitidos en algunas hortalizas de hoja como la lechuga y espinacas, hasta 5000 y 3500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Reglamento (UE) No 1258/2011).

Cuadro 39. Concentración de NO_3^- en parte aérea de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	NO_3^- (%)
75/25	3.967±0.0612 a
50/50	4.229±0.1111 a
25/75	2.658±0.1747 b
R^2	0.884
CV (%)	7.703
DHS	0.470

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. NO_3^- = Nitratos, R^2 = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Micronutrientos

La concentración de los micronutrientos se vio afectada por la relación de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, en Fe, Zn y Mn (Cuadro 40) tuvieron una misma tendencia, a mayor contenido de NH_4^+ (75%) mayor concentración (413.07, 38.181 y 167.841 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente), y mientras tenga mayor

porcentaje de NO_3^- la solución, menor concentración tuvieron en el tejido vegetal. En Mo no se presentó algún efecto por las relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ (Cuadro 41), puesto que tuvieron concentraciones similares en el tejido vegetal y la concentración de B tuvo un comportamiento contrario a lo presentado por Fe, Zn y Mn, a mayor contenido de NO_3^- , mayor concentración en el tejido vegetal, por tanto, se ve una influencia negativa en la concentración a porcentajes mayores a 50% de NH_4^+ en la solución nutritiva.

De acuerdo con Mills y Jones (1996) los intervalos de micronutrientes en pak choi son: Fe (85-363 ppm), Mn (35-52 ppm), B (19-39 ppm), Cu (3-7 ppm), Zn (14-38 ppm) y Mo (1.5-6.4 ppm). La concentración de Fe a una relación 25/75 estuvo por encima de los intervalos, no así las concentraciones a una relación 75/25 y 50/50. La concentración de Zn en los tres tratamientos estuvo dentro del intervalo, en tanto en Mn y B, todas las concentraciones sobrepasaron el intervalo establecido y la concentración de Mo está ligeramente por encima de los límites superiores.

Cuadro 40. Concentración de Fe, Zn y Mn en parte aérea de plantas de pak choi a los 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	Fe	Zn	Mn
	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
75/25	278.98±6.8037 b	23.361±0.6853 b	143.885±4.4836 b
50/50	275.71±11.3333 b	27.670±1.0115 b	148.716±7.1704 ab
25/75	413.07±20.0552 a	38.181±1.7887 a	167.841±4.1509 a
R^2	0.842	0.861	0.475
CV (%)	9.613	9.404	7.924
DHS	52.32	4.719	20.52

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) ± error estándar. Fe = Hierro, Zn = Zinc y Mn = Manganeso, R^2 = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Cuadro 41. Concentración de B y Mo en parte aérea de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones NO₃⁻/NH₄⁺ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺	B	Mo
	mg·kg ⁻¹	
75/25	119.713±4.0144 a	6.6656±0.4745 a
50/50	105.982±4.0547 b	7.0808±0.2426 a
25/75	100.505±2.6437 b	6.8526±0.2124 a
R ²	0.553	0.062
CV (%)	7.466	10.786
DHS	13.698	1.2496

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. B = Boro y Mo = Molibdeno, R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

5.2.2 Kale

5.2.2.1 Variables de desarrollo

Lecturas SPAD

Las lecturas SPAD del cultivo de kale mostraron diferencias significativas por efecto de los tratamientos en ambas fechas de muestreo. A 28 ddt, las plantas regadas con una relación 75/25 presentaron hojas con una mayor intensidad de verdor (60.429) y a la cosecha disminuyó su lectura (57.464), caso contrario lo sucedido con las plantas regadas a 25/75, la lectura SPAD a los 28 días fue menor (57.136) y al momento de la cosecha aumentó su valor (60.964), para las plantas regadas a una relación 50/50, prácticamente no hubo un cambio de la lectura a la mitad del ciclo ni a la cosecha (Figura 24). Por tanto, se observa el efecto de porcentajes mayores de amonio al momento de la cosecha en el color intenso de las hojas de kale. En espinacas no se presentó diferencias estadísticas en las lecturas SPAD a diferentes relaciones de NO₃⁻/NH₄⁺, aunque en promedio hubo un ligero aumento en las lecturas cuando las plantas se regaron con 75% de NH₄⁺ (Conesa *et al.*, 2009), por su parte Bonasia *et al.* (2008), encontraron un efecto directo entre el aumento de las

lecturas SPAD en endivias y el suministro del N como NH_4^+ , ya que cuando se fertilizaron con NO_3^- , se obtuvieron lecturas menores.

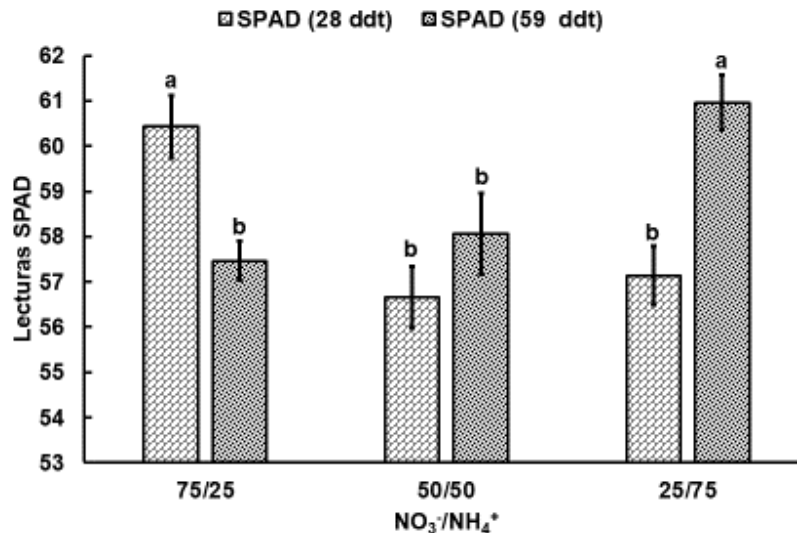


Figura 24. Lecturas SPAD de plantas de pak choi a 52 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero. Valores con la misma letra para un mismo muestreo son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En la gráfica se indica el error estándar.

Ca^{2+} , K^+ y NO_3^+ en extracto celular de pecíolo (ECP)

La concentración de Ca^{2+} en el extracto celular de pecíolo (ECP) no tuvo diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos (Cuadro 44), es decir, la concentración en la planta no se vio afectada por la adición de NH_4^+ en la solución nutritiva en diferentes relaciones con el NO_3^- . La concentración de K^+ en ECP del pak choi estuvo condicionada por los niveles de NH_4^+ de la solución nutritiva, a relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ de 75/25 y 50/50, hubo mayor concentración del elemento en el ECP (6392.9 y 6042.9 ppm) y una menor en aquellas plantas regadas con una solución nutritiva con mayor relación de NH_4^+ (25/75) con una concentración de 5507.1 ppm. La concentración de Ca en el pecíolo de acuerdo con Lara-Izaguirre *et al.* (2019) en el cultivo de lechuga, no hubo efecto por el suministro de diferentes porcentajes de NH_4^+ en la solución de riego, tal como se presenta en los resultados de la presente investigación, lo que permite inferir que la forma de N al nutrir la planta no afectara la concentración de Ca. Por

otra parte, la concentración de Ca en las hojas de *lisanthus* se ve afectada por la adición de NH_4^+ en la SN y a una relación 25/75 ($\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$) se presenta mayor concentración del elemento (Hernández-Pérez *et al.*, 2015)

Cuadro 42. Concentración de Ca^{2+} y K^+ en ECP de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	Ca^{2+}	K^+
	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
75/25	137.857±5.2601 a	6392.9±106.1123 a
50/50	144.286±6.5225 a	6042.9±175.3221 a
25/75	152.857±5.6867 a	5507.1±164.5721 b
R^2	0.078307	0.307081
CV (%)	15.08709	9.493237
DHS	20.145	522.84

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) ± error estándar. Ca^{2+} = Calcio y K^+ = Potasio, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

La concentración de NO_3^- en el ECP, tuvo diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos (Cuadro 43), notándose que a mayor relación de NO_3^- en la solución nutritiva mayor fue la concentración de NO_3^+ (6321.429) en el ECP y en las plantas que se regaron con la solución nutritiva con mayor relación de NH_4^+ hubo menor concentración de NO_3^- (5635.714 ppm). Lara-Izaguirre *et al.* (2019) en lechuga encontraron la misma tendencia obtenida en la presente investigación, a medida que la SN tuvo mayor contenido de NO_3^- en la relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, mayor concentración de NO_3^- hubo en el peciolo, tal como sucede con el kale, y a medida que aumenta el NH_4^+ en la solución, disminuye la concentración de NO_3^- en el peciolo. En el cultivo de espinacas se obtuvo una menor concentración de NO_3^- en las hojas de las plantas regadas con una solución aplicando 25% de NH_4^+ , lo que representa una disminución del 38% (Xing *et al.*, 2015) y el efecto positivo de la nutrición con NH_4^+ para la disminución de NO_3^- en cultivos de hoja.

Cuadro 43. Concentración de NO₃⁻ en ECP de plantas de kale a 58 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones NO₃⁻/NH₄⁺ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻ (mg·kg ⁻¹)
75/25	6321.429±158.6961
50/50	6100.000±230.1457
25/75	5635.714±189.4489
Chi cuadrada	6.1843
p-value	0.0454
Significancia	**

Media ± error estándar ** $p\chi^2 \leq 0.05$ indica significancia estadística.

Peso fresco y resistencia a la penetración

El peso fresco tuvo diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos (Cuadro 44), con un efecto positivo en el aumento de la biomasa al suministra mayor porcentaje de NH₄⁺ a la solución de riego, a una relación 50/50 y 25/75 hubo mayor peso fresco (349.00 y 349.07 g respectivamente) y una reducción del mismo a una relación 75/25. Bonasia *et al.* (2008) en cultivo de endivia (*Cichorium endivia*) no detectaron un efecto diferente en el peso fresco en relación a la nutrición con NO₃⁻ y NH₄⁺, es decir, no afecta el NH₄⁺ en el peso fresco. González *et al.* (2009) en cultivo de albahaca no distinguieron diferencias estadísticas en biomasa total en función de relaciones de NO₃⁻/NH₄⁺, aunque el promedio de biomasa si fue mayor en plantas regadas con solución con 40% de amonio (40/60 NH₄⁺/NO₃⁻), lo que permite inferir que hay cultivos tolerantes a la aplicación de NH₄⁺, a pesar de que Britto y Kronzucker (2002) afirmaron que los cultivos de la familia Brassicaceae son sensibles al NH₄⁺.

La resistencia a la penetración tuvo efectos por la aplicación de NH₄⁺ en la solución, a mayor porcentaje de NH₄⁺, el tallo de kale presentó menor resistencia a la penetración.

Cuadro 44. Peso fresco (PF) y resistencia a la penetración (RP) de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	PF (g)	RP (kg)
75/25	314.43±4.7725 b	7.950±0.1413 a
50/50	349.00±8.9332 a	6.700±0.1288 b
25/75	349.07±10.1019 a	6.750±0.1304 b
R^2	0.230856	0.589877
CV (%)	9.156142	7.009346
DHS	28.456	0.4604

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) ± error estándar. R^2 = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Peso seco de hoja, volumen, longitud y peso seco de raíz

El peso seco de la hoja no se vio influenciado por diferentes relaciones de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, puesto que todos los valores oscilaron entre 29.7 g (75/25) y 30.7 g (25/75), lo que permite inferir que el peso seco de las hojas de kale no se vieron afectados por la adición de NH_4^+ en la solución. Lara-Izaguirre *et al.* (2019) en lechuga se observaron una diferencia en el peso seco de hoja, pero cuando no hubo aplicación de NH_4^+ en la solución de riego, ya que a 20, 35 y 50% de NH_4^+ no se observó diferencias en el peso seco de la hoja. En cultivo de fresa hubo un efecto negativo en el peso seco de las hojas a contenidos muy altos de NH_4^+ (75%) y un mayor peso seco de las hojas a una relación 75/25 ($\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$) (Tabatabaei *et al.*, 2008).

El peso seco de raíz se vio afectado negativamente por altos contenido de NH_4^+ , a porcentajes de 50 y 75 fueron menos los pesos (6.502 y 6.499 g respectivamente) en comparación con 25% de NH_4^+ , donde fue el mayor peso presentado (7.719 g), lo que implica que el NH_4^+ afecta el crecimiento de la raíz, por tanto el volumen y la longitud radical también verán limitado su crecimiento tal como se observa en el Cuadro 45, a mayor contenido de NO_3^- en la relación, mayor fue el volumen y la longitud de la raíz (114.000 cm^3 y 36.400 cm respectivamente) y a mayor contenido de NH_4^+ se limitó el crecimiento, tal como lo demuestran Rivera-Espejel *et al.* (2014)

en cultivo de tomate, donde la adición de altos contenidos de NH_4^+ en la solución de riego afecta el volumen ya que lo disminuye, en tanto el peso seco de la raíz en lechuga también disminuye a medida que aumenta el contenido de NH_4^+ , a una relación 50/50 el peso seco de la raíz es menor en comparación con relaciones 100/0, 80/20 y 65/35 (Lara-Izaguirre *et al.*, 2019)

Cuadro 45. Peso seco de hoja (PSH), peso seco de raíz (PSR), volumen radical (VR) y longitud radical (LR) de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	PSH	PSR	VR	LR
	g		cm³	cm
75/25	29.786±0.5362 a	7.719±0.0904 a	114.000±5.0990 a	36.400±1.1979 a
50/50	30.674±0.6970 a	6.502±0.3057 b	74.000±1.8708 b	31.600±0.4301 b
25/75	30.727±0.8330 a	6.499±0.3062 b	79.000±2.4495 b	32.300±0.7000 b
R ²	0.028	0.559	0.870	0.614
CV (%)	8.609	8.262	8.643	5.609
DHS	2.410	0.963	12.978	3.164

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) ± error estándar. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta significativa.

Hojas comerciales de kale

Las determinaciones de peso fresco, número de hojas, longitud y ancho de hojas comerciales en el cultivo de kale no tuvieron efectos significativos por las diferentes relaciones de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ (Cuadro 46). El peso fresco total fue mayor a relaciones 50/50 y 25/75, aunque el peso fresco de las hojas comerciales fue similar en los tres tratamientos, además el número de hojas comerciales fueron similares (17.571, 18.000 y 18.286), lo que significa que no hay efecto por la adición de una u otra forma de N a la solución. Tanto la longitud como el ancho de hojas no tuvieron diferencias estadísticamente significativas por efecto de los tratamientos, presentando valores similares, entre 20 y 21 cm de longitud y alrededor de 12 cm de ancho, lo cual no afecta la relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ en la solución para el desarrollo de las hojas. Las hojas comerciales son aquellas

mayores a 10 cm, lo cual dependiendo de la solución (relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$), las plantas responderán de diferente manera, en kale no hubo efecto en el peso tal como encontraron Wang *et al.* (2009) en el cultivo de espinaca, donde si se observa una disminución del peso fresco total a medida que se aumenta la relación de NH_4^+ , de igual forma Urlic *et al.* (2017) detectaron un efecto positivo entre el peso fresco y el aumento de NO_3^- en la solución, lo que se pudo inferir en una tolerancia al NH_4^+ por parte del kale. El número de hojas tampoco se vio influenciado por las relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, Bonasi *et al.* (2008), en cultivo de endivia obtuvieron un ligero aumento del número de hojas por planta en aquellas regadas con NH_4^+ sobre aquellas tratadas con NO_3^- . Al tener pesos fresco similares y número de hojas semejantes, las longitudes y ancho de las hojas son parecidas en sus dimensiones, demostrando que la forma de N en la solución no influye en las hojas comerciales de kale en la presente investigación.

Cuadro 46. Peso fresco de hojas comerciales (PFHC), número de hojas comerciales (NHC), longitud de hojas comerciales (LHC) y ancho de hojas comerciales (AHC) de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	PFHC	NHC	LHC	AHC
	g		cm	
75/25	264.00±4.2864 a	17.571±0.5714 a	20.264±0.4721 a	12.057±0.1633 a
50/50	286.21±8.3647 a	18.000±0.5027 a	21.021±0.5819 a	12.521±0.2560 a
25/75	284.00±9.5331 a	18.286±0.4249 a	20.086±0.4307 a	12.550±0.1983 a
R ²	0.114	0.026	0.380	0.188
CV (%)	10.400	10.489	0.0484	0.0822
DHS	26.631	1.734	1.719	0.721

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) ± error estándar. R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Diámetro y peso seco de tallo

El peso seco de tallo y el diámetro de tallo, no presentaron normalidad de datos, y se hizo una prueba no paramétrica de Kruskal Wallis (Cuadro 47). En peso seco de tallo, se observa que a

medida que la solución contiene mayor cantidad de NH_4^+ (75%) es mayor el peso seco (12.8763 g), en medida que se reduce el NH_4^+ y aumentan los NO_3^- , el peso de tallo se reduce al igual que su diámetro, a una relación 75/25 es menor y al aumento de NH_4^+ entre 50 y 75% aumenta el grosor del tallo. Con esto se observa la influencia positiva del NH_4^+ en el tallo, puesto que genera mayor grosor y mayor peso seco. Wenceslau *et al.* (2021) en cultivo de lechuga identificaron una disminución en el diámetro de tallo al aumentar el contenido de amonio a la relación.

Cuadro 47. Peso seco de tallo (PST) y diámetro de tallo (DT) de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	PST (g)	DT (mm)
75/25	6.9742±0.1647	13.7600±0.2200
50/50	8.3377±0.3248	15.0700±0.3084
25/75	12.8763±0.5975	15.5279±0.3750
Chi cuadrada	30.5420	12.7502
$p\chi^2$	<.0001	0.0017
Significancia	**	**

Media ± error estándar ** $p\chi^2 \leq 0.05$ indica significancia estadística.

5.2.2.2 Variable de producción

La producción del cultivo de kale está dado por las hojas comercialmente listas (de 10 a 20 cm de longitud). En el presente trabajo, se muestra (Cuadro 48) el peso total promedio de las hojas comerciales por planta, y la densidad de siembra para poder obtener el rendimiento estimado ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y de acuerdo con Cuadro 48 y a los pesos fresco de hojas comerciales del Cuadro 46, se tiene que no existió algún efecto en el rendimiento por efecto de la relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ de la SN. Los tres tratamientos tienden a un rendimiento alrededor de $7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, lo que significa que la forma de N usada es indiferente a la planta para poder producir hojas comerciales listas a venta.

Cuadro 48. Rendimiento comercial de kale a 59 ddt regados con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	Rendimiento ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
75/25	7.128±0.1369 a
50/50	7.728±0.2672 a
25/75	7.668±0.3045 b
R^2	0.114
CV (%)	10.400
DHS	0.719

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. R^2 = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

5.2.2.3 Concentración nutrimental

Macronutrientes

La concentración de N presentó diferencias estadísticamente significativas por efecto de la CE de la SN (Cuadro 51), a mayor porcentaje de NH_4^+ en la solución, mayor concentración de N en el tejido vegetal, lo cual infiere que el NH_4^+ tiene un efecto positivo en el aumento de N en la planta, lo que representa una disminución en el contenido de NO_3^- en las hojas y un color verde más intenso.

La concentración de N tuvo una relación directa con el suministro de NH_4^+ de forma proporcional, a medida que aumenta el porcentaje de NH_4^+ de la solución aumenta la concentración de N en hojas de tomate (Borgognone *et al.*, 2013), lo mismo sucede en fresa, a mayor porcentaje de NH_4^+ en la relación, mayor contenido de N en el cultivo (Choi *et al.*, 2011), esta tendencia de igual forma se presentó en kale, lo que sugiere el efecto positivo del NH_4^+ al contenido de N total en los cultivos.

Las concentraciones de P, Mg y S tuvieron diferencias estadísticamente significativas, aunque con valores más próximos entre sí. En el P y S, a mayor contenido de NH_4^+ en la solución, mayor concentración de los elementos, viendo una reducción a mayor contenido de NO_3^- en la relación.

El Mg tuvo un comportamiento inverso, a mayor NH_4^+ , las plantas tuvieron menor concentración de Mg en el tejido vegetal, no presentando diferencias a 75/25 y 50/50.

El Ca y K (Cuadro 50) no fueron afectados en sus concentraciones por efectos de la forma del N en la solución, es decir, no influyó la relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ en la concentración de los elementos. Para el caso del K, los valores rondaron entre los 12.3 y 13.9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, en tanto el Ca entre 14.1 y 16.5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. En investigaciones se ha observado una disminución de Ca y K a medida que va aumentando el contenido de NH_4^+ en la relación como en el cultivo de fresa (Choi *et al.*, 2011) y en el caso de tomate (Borgognone *et al.*, 2013) igual se ha observado que el Ca disminuye a contenidos altos de NH_4^+ , pero no así el K, pues se ha mantenido constante su concentración, lo que sugiere que no hubo efecto del NH_4^+ en varios niveles en la concentración del elemento.

Cuadro 49. Concentración de N, P y K en parte aérea de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	N	P	K
	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		
75/25	45.247±1.0548 c	2.6132± 0.0718 b	12.306±0.6087 a
50/50	53.282±0.9081 b	3.0494± 0.1577 ab	13.957±0.9817 a
25/75	63.290±0.9297 a	3.3070± 0.1098 a	13.991±0.8402 a
R^2	0.975	0.594	0.185
CV (%)	3.127	8.858	13.743
DHS	2.514	0.447	3.111

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p\leq 0.05$) \pm error estándar. N = Nitrógeno, P = Fósforo y K = Potasio, R^2 = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Mills y Jones (1996) explicaron que los intervalos de concentración de macronutrientes en el cultivo de kale son: N (3.10-5.50%), P (0.30-0.70%), K (2.00-4.00%), Ca (1.30-2.50%), Mg (0.25-0.70%) y S (no dato). La concentración de N en plantas regadas con una SN 25/75 supere al límite superior del rango, mientras tanto los que está en una relación 75/25 y 50/50 están dentro del rango. El P en plantas en una relación 75/25 está por debajo de los rangos, mientras que a 50/50 y 25/75

no. La concentración de K en los tres tratamientos no está dentro de los rangos establecidos, todos por debajo del límite inferior. El Ca, las tres concentraciones de los tratamientos están dentro del rango establecido. La concentración de Mg, en la relación 75/25 y 50/50 son ligeramente superiores al límite máximo del rango, mientras que a una relación 25/75 está dentro del intervalo.

Cuadro 50. Concentración de Ca, Mg y S en parte aérea de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	Ca	Mg	S
	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		
75/25	16.508±1.2805 a	7.0881±0.2144 a	20.0077±0.6309 b
50/50	15.482±0.2239 a	7.5641±0.2906 a	23.9337±0.4875 a
25/75	14.122±0.5919 a	5.8588±0.1576 b	24.3756±0.9169 a
R ²	0.260	0.714	0.662
CV (%)	11.997	7.440	6.889
DHS	3.111	0.858	2.647

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) ± error estándar. Ca = Calcio, Mg = Magnesio y S = Azufre, R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Nitratos

La concentración de NO_3^- en tejido vegetal de kale ha presentado diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos como se observa en el Cuadro 51. Se observa a medida que disminuye el contenido de NO_3^- de la solución de riego, también disminuye el contenido de NO_3^- en tejido vegetal, lo que implica un efecto positivo de suministro de NH_4^+ a la disminución de NO_3^- . Estos datos coinciden con la tendencia presentada en NO_3^- en ECP del mismo cultivo, a medida que aumenta el porcentaje de NH_4^+ a la solución, menor será la concentración de NO_3^- en la planta. En el cultivo de kale, Correia *et al.* (2010) detectaron valores desde 41 hasta 1319 $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{kg}^{-1}$, lo que significa que los valores obtenidos están fuera de los niveles aquí propuestos al convertir los valores a $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. De acuerdo con el Reglamento (UE) No 1258/2011 del Diario Oficial de la Unión Europea, en algunos cultivos de hojas como lechugas

están permitidos niveles máximos de hasta 5000 mg NO₃⁻·kg⁻¹, que son inferiores a los obtenidos en kale del presente trabajo. Los niveles de NO₃⁻ disminuyen con el aumento del NH₄⁺ a la solución, de esta manera, hay un efecto positivo en la disminución de NO₃⁻ y el suministro de NH₄⁺ como fuente de nutrición de N. Los cultivos tienden a tener contenidos máximos de NO₃⁻ que permitan su consumo, las hortalizas de hojas y en especial de la familia de las Brassicaceae tienen a tener contenidos altos de NO₃⁻ en sus hojas.

Cuadro 51. Concentración de NO₃⁻ en parte aérea de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones NO₃⁻/NH₄⁺ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻ (%)
75/25	4.949±0.2031 a
50/50	3.869±0.1747 b
25/75	3.345±0.2535 b
R ²	0.711
CV (%)	11.746
DHS	0.803

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) ± error estándar. NO₃⁻ = Nitratos, R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Micronutrientes

La concentración de Fe, Zn (Cuadro 52), Mn y B (Cuadro 53) no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) por efecto de los tratamientos, es decir, fue indiferente la forma de N en la solución en la concentración de estos elementos en el tejido vegetal de plantas de kale. La concentración de Cu y Mo si presentaron una diferencia significativa estadística, en Cu a mayor contenido de NO₃⁻ en la relación de la solución mayor fue la concentración del elemento, observando así un efecto negativo de la concentración al suministro de NH₄⁺ a la solución de riego. De igual forma pasa con la concentración de Mo, a una relación de 75/25 y 50/50 los valores son cercanos y superiores y mientras se aplica mayor contenido de NH₄⁺ a la SN el valor disminuye.

De acuerdo con Mills y Jones (1996) las concentraciones de micronutrientes en kale son: Fe (60-300 ppm), Mn (30-250 ppm), B (30-100 ppm), Cu (4-25), Zn (30-250 ppm) y Mo (0.10-0.15 ppm). Las concentraciones de Fe, Mn y Cu en kale se encuentran dentro del rango en todos sus tratamientos (75/25, 50/50 y 25/75). El B a medida que aumenta el contenido de NH_4^+ en la solución (mayor a 50%) los valores de concentración se encuentran fuera del rango del límite superior, estando únicamente dentro el valor a una relación 75/25. La concentración de Zn en los tres tratamientos no entra en los rangos, todos por debajo del rango. Las concentraciones de Mo en las plantas de los tres tratamientos están muy altas y fuera de rango en el límite superior.

Cuadro 52. Concentración de Fe, Cu y Zn en parte aérea de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	Fe	Cu	Zn
	mg·kg ⁻¹		
75/25	179.73±19.2115 a	7.4692±0.3202 a	21.896±4.4836 a
50/50	187.08±6.9143 a	6.6685±0.4738 ab	23.808±7.1704 a
25/75	215.72±9.7626 a	5.7970±0.2369 b	22.752±4.1509 a
R ²	0.261	0.477	0.218
CV (%)	15.047	12.026	7.392
DHS	49.297	1.348	2.846

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) ± error estándar. Fe = Hierro, Zn = Zinc y Mn = Manganeseo, R² = Coeficiente de determinación, CV = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

Cuadro 53. Concentración de Mn, B y Mo en parte aérea de plantas de kale a 59 ddt regadas con solución Steiner a diferentes relaciones NO₃⁻/NH₄⁺ y producidas en perlita en condiciones de invernadero.

NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺	Mn	B	Mo
	mg·kg ⁻¹		
75/25	118.933±6.7511 a	93.743±2.5555 a	7.9436±0.4098 ab
50/50	104.802±1.8440 a	102.896±3.6750 a	8.6450±0.5101 a
25/75	119.188±4.6888 a	103.802±2.9240 a	6.7040±0.5595 b
R ²	0.323	0.351	0.395
CV (%)	9.514	6.892	14.315
DHS	18.349	11.646	1.875

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) \pm error estándar. Mn = Manganeseo, B = Boro y Mo = Molibdeno, R² = Coeficiente de determinación, C.V. = Coeficiente de variación, DHS = Diferencia significativa honesta de Tukey.

5.3 Cinética de producción de hojas

5.3.1 Cinética de producción de hojas en función de la conductividad eléctrica de la solución Steiner

La producción de hojas en las hortalizas de hoja, es de mucha importancia, pues es la parte de consumo del cultivo, por lo que generar un gran número de hojas y de buen tamaño se verá reflejado en el rendimiento.

La cinética de producción de hojas en el cultivo de pak choi se puede apreciar en la Figura 25. Los cuatro tratamientos al momento del trasplante tuvieron 4 hojas por planta y en función al nivel de CE (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) se presentó el comportamiento ascendente mostrado. La media de hojas por planta a los 14 ddt, fue menor a una CE de 0.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (6.2) y mayor a 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (7.1), al pasar 32 ddt siguió el mismo comportamiento, a 0.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (10.7) fue la menor producción de hojas y a 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (12.4) la mayor, para finalizar a los 47 ddt (cosecha), a una CE de 0.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, hubo una producción de 15 hojas en promedio por planta (menor producción) y a una CE de 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ se observó mayor producción con 19 hojas en promedio. Cabe mencionar que con el paso del tiempo se fue haciendo mayor la diferencia entre la producción de hojas entre tratamientos.

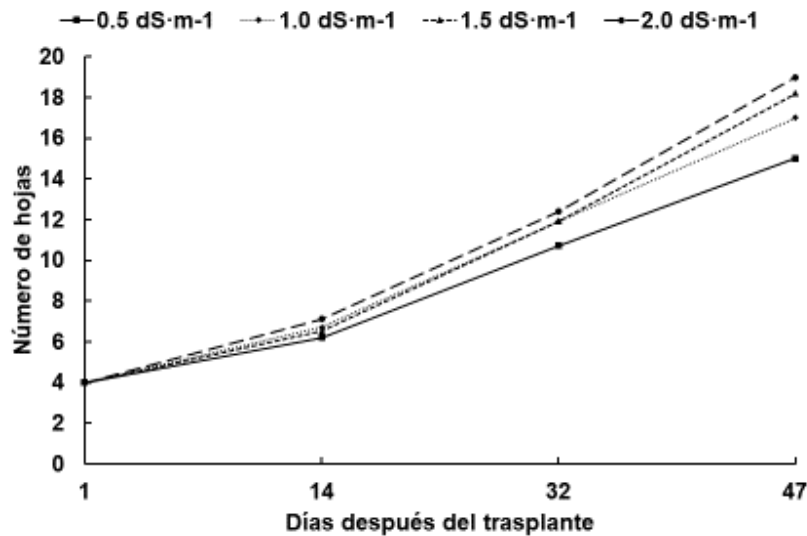


Figura 25. Cinética de producción de hojas en plantas de pak choi producidas en perlita en condiciones de invernadero en función de tres fechas y cuatro CE de la solución nutritiva Steiner.

La cinética de producción de hojas de kale se observa en la Figura 26, observando un compartimento ascendente al paso del tiempo (trasplante día 0 y cosecha día 54). Al momento del trasplante los cuatro tratamientos (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) tuvieron 4 hojas por planta, a los 14 ddt no se presentó una diferencia estadísticamente significativa por efecto de los tratamientos, aunque a una CE de 0.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ se tuvieron 6.5 hojas por planta en promedio y a una CE de 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 7.2. A los 32 ddt estadísticamente a una CE de 0.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ hubo menor producción de hojas por planta con 10.8 y mayor con los tres tratamientos restantes (1.0, 1.5 y 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) con una producción de 12.5, 13.1 y 13 respectivamente y a la cosecha (47 ddt) se hizo más notable la diferencia estadística, con un promedio de hojas por planta de 14.2 a 0.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y 18.3 a 1.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, lo cual quiere decir, que al final del ciclo, las plantas que menor producción de hojas tuvieron fueron las regadas a una CE de 0.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

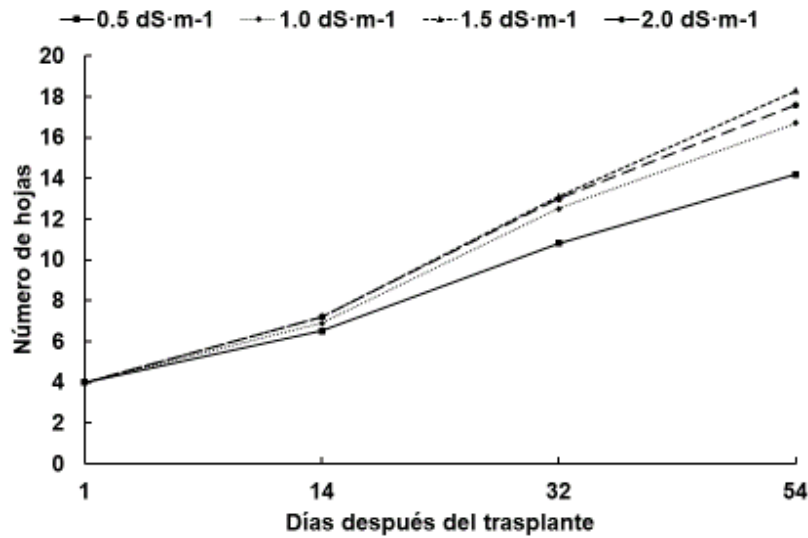


Figura 26. Cinética de producción de hojas en plantas de kale producidas en perlita en condiciones de invernadero en función de tres fechas y cuatro CE de la solución nutritiva Steiner.

5.3.2 Cinética de producción de hojas en función de la relación nitrato/amonio de la solución Steiner

La cinética de producción de hojas pak choi en función de la relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ en la solución nutritiva se observa en la Figura 27, notando una producción ascendente al paso de los días, desde el trasplante hasta la cosecha. Al momento de la cosecha las plantas de los tres tratamientos tuvieron (75/25, 50/50 y 25/75) 4 hojas, a los 14 ddt no se presentó diferencias estadísticas significativas, con un promedio de hojas por plantas por tratamiento de 6.5, a los 28 ddt se observó una diferencia estadística entre tratamientos, a 75/25 se tuvieron 11.2 hojas por planta en promedio y a 25/75 10.2, observándose un ligero efecto en la disminución de hojas por parte del NH_4^+ en la solución de riego de ese tratamiento. A los 42 ddt a una relación 75/25 hubo en promedio 15.4 hojas por planta y 14.4 a 25/75, y a la cosecha (52 ddt), se notó más la diferencia con 19.4 hojas en promedio por planta en el tratamiento 75/25 y 17.7 hojas promedio por planta en el tratamiento 25/72.

De acuerdo con la Figura 28, el efecto del NH_4^+ comenzó a ser factor en la producción de hojas después del primer conteo, ya que a los 28 ddt empezó haber diferencias entre tratamientos, con un ligero efecto negativo en las plantas regadas con mayor contenido de NH_4^+ (75%) en la solución, de acuerdo con Wenceslau *et al.* (2021) en cultivo de lechuga hidropónica se ve disminuida la producción de hojas en medida que aumenta el NH_4^+ en la solución.

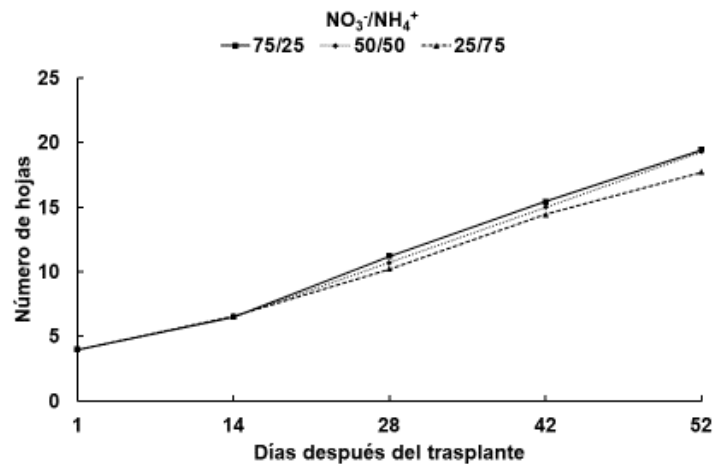


Figura 27. Cinética de producción de hojas en plantas de pak choi producidas en perlita en condiciones de invernadero en función de cuatro fechas y tres relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ de la solución nutritiva Steiner.

La cinética de producción de hojas en kale tuvo un comportamiento como el observado en la Figura 32, por el efecto del riego de la solución nutritiva a diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ (75/25, 50/50 y 25/75). Las plantas de los tres tratamientos comenzaron con 4 hojas por planta y a los 14 ddt no había diferencias estadísticas por efecto del tratamiento con un promedio de 6.5-6.6 hojas por planta. A los 42 ddt se seguía presentando la misma constante (sin diferencias estadísticas) con un promedio de 12.2-12.9 hojas por planta por tratamiento y al final de la cosecha (59 ddt) tampoco hubo una diferencia estadísticamente significativa por efecto de los tratamientos con un promedio de 21.3-22.8 hojas por plantas.

Con esto se infiere que el suministro de una u otra forma de N a la solución de riego de plantas de kale no afecta en la producción de hojas, es decir, a la planta le es indiferente si se nutre con NO_3^- o NH_4^+ , ya que produciré el mismo número de hojas en condiciones de invernadero y en maceta con sustrato perlita.

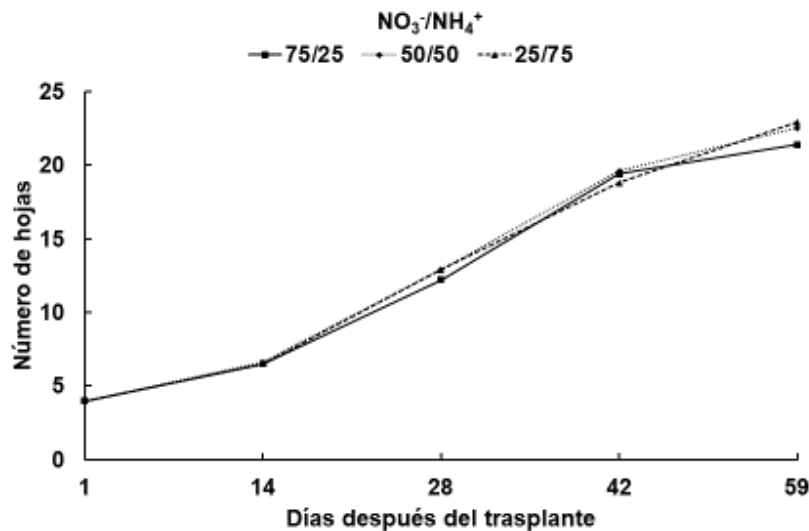


Figura 28. Cinética de producción de hojas en plantas de kale producidas en perlita en condiciones de invernadero en función de cuatro fechas y tres relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ de la solución nutritiva Steiner.

6. CONTRASTE DE HIPÓTESIS CON RESULTADOS

Hipótesis general: Las diferentes soluciones nutritivas producen un efecto similar en el desarrollo, producción y concentración nutrimental tanto de plantas de pak choi (*Brassica rapa subespecie Chinensis L.*) como de kale (*Brassica oleracea var. acephala*) cultivadas bajo invernadero.

La hipótesis se rechaza, ya que en ambos experimentos la aplicación de diferentes soluciones nutritivas (diferentes CE y diferentes relaciones $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$) generó diferencias en el desarrollo, producción y concentración nutrimental de plantas de pak choi y kale.

Hipótesis particular: La conductividad eléctrica de $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de la solución nutritiva Steiner favorece un mejor desarrollo, producción y concentración nutrimental tanto de plantas de pak choi como de kale cultivadas bajo invernadero.

La hipótesis se acepta, a pesar de que la conductividad eléctrica de $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de la solución nutritiva Steiner favoreció en plantas de pak choi un color más intenso de las hojas (mayor lectura SPAD), mayor peso fresco y peso seco de tallo y hoja, mayor diámetro de tallo, mayor área foliar, mayor concentración de K^+ en ECP y mayor rendimiento. También favoreció una mayor concentración de N, NO_3^- y P. En kale favoreció un verde más intenso, mayor K^+ en ECP, mayor peso fresco total, mayor diámetro de tallo, mayor peso seco de hoja, tallo y raíz, mayor volumen radical, mayor número de hojas comerciales, así como mayor peso, longitud y ancho de la misma, mayor rendimiento y mayor concentración de N y NO_3^- . A pesar de que se favoreció el desarrollo, la producción y la concentración de los cultivos, se decidió que la mejor CE a utilizar como base para el experimento 2 sería la de $1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, al tener menor concentración de NO_3^- y a la vez no estar muy por debajo de los valores de las variables antes mencionadas, puesto que el rendimiento disminuyó en gran medida en ambos cultivos con SN por debajo de $1.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Hipótesis particular: La relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ 75/25 de la solución nutritiva Steiner facilita un mejor desarrollo, producción y concentración nutrimental tanto de plantas de pak choi como de kale cultivadas bajo invernadero.

La hipótesis se rechaza, ya que la relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ 75/25 de la solución nutritiva Steiner facilitó un mejor desarrollo peso fresco, área foliar, diámetro de tallo y resistencia a la penetración al igual que una relación 50/50, una mayor volumen y peso seco de raíz y tallo, mayor rendimiento al igual

que al 50/50 y mayor concentración de Mg y B en tejido vegetal en plantas de pak choi. En kale facilitó una mayor concentración de NO_3^- en ECP, una mayor resistencia a la penetración y un mayor volumen, longitud y peso seco de raíz.

Hipótesis particular: La cinética de crecimiento tanto de plantas de pak choi como de kale son similares de acuerdo con diferentes conductividades eléctricas y diferentes relaciones de nitrato y amonio de la solución nutritiva Steiner cultivadas bajo invernadero.

La hipótesis se rechaza, debido a que la cinética de crecimiento de hojas en pak choi no fueron similares a diferentes conductividades eléctricas, hubo diferencias, presentándose con mayor crecimiento a CE de $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ al igual que en kale.

La cinética de crecimiento de hojas en pak choi no fueron similares en función de la relación $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+$, ya que a 75/25 y 50/50 hubo mayor producción de hojas y en kale se acepta la hipótesis al no haber diferencias en la producción de hojas por efecto de los tratamientos.

7. CONCLUSIONES

Los objetivos planteados en la investigación se cumplieron en su totalidad. Se analizaron el efecto de diferentes soluciones nutritivas en el desarrollo, producción y concentración nutrimental de plantas de pak choi y kale. Además, se midió el efecto que tuvieron diferentes CE y diferentes relaciones de nitrato y amonio en el desarrollo, producción y concentración nutrimental en ambos cultivos producidos en invernadero. Por último, se describió la cinética de crecimiento de plantas de pak choi y kale, contabilizando el número de hojas en varios muestreos a lo largo del ciclo de cultivo, en donde se observó el efecto de la CE y la relación nitrato y amonio de la solución Steiner sobre las plantas.

El uso de soluciones nutritivas con diferentes concentraciones nutrimentales confiere un efecto diferente sobre el desarrollo de plantas de pak choi y kale cultivadas en invernadero.

El rendimiento de ambos cultivos está en función de la CE y la relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$. A una CE de $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ hay mayor rendimiento, aunque se puede utilizar una CE de $1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, que en otras épocas del año puede generar rendimientos similares. Y una relación de hasta 25/75 puede generar rendimientos altos en kale y hasta 50/50 en pak choi.

No se presentó efecto significativo en concentración nutrimental en cada uno de los cultivos.

El NH_4^+ como fuente de nitrógeno en porcentajes altos en la solución nutritiva produce kale con la misma intensidad de verde que en porcentajes menores. En el cultivo de pak choi las altas concentraciones de amonio (25/75) produce intoxicación en el cultivo.

La información obtenida en la presente investigación sirve como para aquellos productores que gusten de producir pak choi y kale en condiciones de invernadero y sustrato, puesto que con los resultados obtenidos se puede especificar la nutrición vegetal de las plantas y que genere la mayor producción, así como la reducción de nitrato perjudiciales para el humano. Además, con lo obtenido se puede hacer recomendaciones a aquellos productores que ya produzcan, como eficientizar sus fertilizantes y que ocupen lo necesario para obtener plantas de calidad y cantidad. En base en ello, una CE de 1.5 a $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, se obtendrá plantas de pak choi y kale más grandes, pero con altos contenidos de nitratos, así como la aportación de amonio como fuente de nitrógeno hasta en un 50% para obtener rendimientos satisfactorios por ejemplo de kale.

8. RECOMENDACIONES

La investigación nos proporcionó datos interesantes de como producir estas Brassicas, en caso especial de sustrato de perlita en bajo invernadero.

A corto plazo se pretende lograr que los productores amplíen su gama de cultivos en la producción u ocupación de sus tierras, introduciendo el pak choi y kale al campo y al mercado para consumo regional. De esta manera y con la investigación, hacer recomendaciones y asesorar la manera de como producir dichas plantas, teniendo como base la nutrición y la generación de rendimientos con apoyo de la investigación.

A mediano plazo se intenta sentar las bases para una producción más intensiva y poder ampliar el mercado y el consumo de estos cultivos, que son nutraceuticos al ser buenos para el consumo humano, haciendo promoción de los beneficios de los cultivos y como producir y obtener rendimientos aceptables en condiciones de invernadero.

A largo plazo se pretende seguir investigando a cerca de los cultivos, en específico en los metabolitos secundarios que tienen éstos, ya que son benéficos contra ciertas enfermedades y padecimientos, y de esta manera lograr producir el pak choi y kale en cantidad y calidad.

9. LITERATURA CITADA

- Abbey, L., and P. Appah. 2017. Pot-grown Swiss chard and kale responses to variable rate of manure compost in mycorrhizal fungi inoculated medium. *Acta Hort.* 1164: 241-248.
- Albaho, M., N. Bhat., B. M. Thomas., S. Isathali., P. George., and Ghloum, D. 2013. Alternative growing media for production of cucumber cultivar 'banan' for soilless culture in kuwait. *Acta Hort.* 1004: 115-121.
- Albornoz, F., and J. H. Lieth. 2015. Over fertilization limits lettuce productivity because of osmotic stress. *Chil. J. Agr. Res.* 75(3): 284–290.
- Antúnez-Ocampo, O. M., M. Sandoval-Villa., G. Alcántar-González., y M. Solís-Martínez. 2014. Aplicación de amonio y nitrato en plantas de *Physalis peruviana* L. *Agrociencia.* 48(8): 805-817.
- Azarimi, R., and B. Esmaeilpour. 2010. Effect of NO_3^- to NH_4^+ ratio on growth, yield and element composition of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *J Food Agric Environ.* 8(2): 607-610.
- Balkaya, A., and R. Yanmaz. 2005. Promising kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) populations from Black Sea region, Turkey. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* 33:1-7.
- Barickman, T. C., K. M. Ku., and C. E. Sams. 2020. Differing precision irrigation thresholds for kale (*Brassica oleracea* L. var. *Acephala*) induces changes in physiological performance, metabolites, and yield. *Environ. Exp. Bot.* 180: 104253.
- Bar-Tal, A., and E. Pressman. 1996. Root restriction and potassium and calcium solution concentrations affect dry-matter production, cation uptake, and blossom-end rot in greenhouse tomato. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 121 (4): 649-655.
- Bian, Z., N. Jiang., S. Grundy., and C. Lu. 2018. Uncovering LED light effects on plant growth: New angles and perspectives – LED light for improving plant growth, nutrition and energy-use efficiency. *Acta Hort.* 122: 491-498.
- Bonasia, A., G. Conversa., M. Gonnella., F. Serio., and P. Santamaria. 2008. Effects of ammonium and nitrate nutrition on yield and quality in endive. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 83(1): 64–70.
- Bonetti, F., G. Brombo., and G. Zuliani. 2017. Nootropics, Functional Foods, and Dietary Patterns for Prevention of Cognitive Decline. *Nutrition and Functional Foods for Healthy Aging.* 211-232.
- Borgognone, D., G. Colla., Y. Rouphael., M. Cardarelli., E. Rea., and D. Schwarz. 2013. Effect of nitrogen form and nutrient solution pH on growth and mineral composition of self-grafted and grafted tomatoes. *Sci. Hortic.* 149: 61–69.

- Britto, D. T., and H. J. Kronzucker. 2002. NH_4^+ toxicity in higher plants: a critical review. *J. Plant Physiol.* 159(6): 567–584.
- Brkić, D., J. Bošnjir., M. Bevardi., A. G. Bošković., S. Miloš., D. Lasić., A. Krivohlavek., A. Racz., A. M. Čuić., and N. U. Trstenjak. 2017. Nitrate in leafy green vegetables and estimated intake. *Afr J Tradit Complement Altern Med.* 14(3): 31–41.
- Cabrera, R. 1999. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Rev Chapingo Ser Hortic.* 5: 5-11.
- Caralde, R.A., and R. A. Salas. 2015. Effects of novel organic nutrient solution on yield and quality of pakchoi [*Brassica rapa ssp. chinensis* (L.) hanelt] under aggregate hydroponic system. *Acta Hortic.* 1088: 477-480.
- Carrasco, G., P. Ramírez., y H. Vogel. 2007. Efecto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva sobre el rendimiento y contenido de aceite esencial en albahaca cultivada en NFT. *Idesia.* 25(2): 59-62.
- Casajús, V., M. Perini., R. Ramos., A. B. Lourenco., C. Salinas., E. Sánchez., D. Fanello., P. Civello., D. Frezza., and G. Martínez. 2021. Harvesting at the end of the day extends postharvest life of kale (*Brassica oleracea var. Sabellica*). *Sci. Hortic.* 276: 109757.
- Cho, Y. Y., and J. E. Son. 2007. Effects of Electrical conductivity on growth and yield of hydroponically-grown pak-choi (*Brassica campestris ssp. chinensis*). *Hortic Environ Biotechnol.* 48 (2): 97-101.
- Choi, M. J., A. Latigui., and W. C. Lee. 2011. Growth and nutrient uptake responses of “Seolhyang” strawberry to various ratios of ammonium to nitrate nitrogen in nutrient solution culture using inert media. *Afr. J. Biotechnol.* 10(59): 12567-12574.
- Combrink, N. J. J. 2013. Mixing a balanced nutrient solution. *Acta Hortic.* 1014: 13-27.
- Conesa, E., D. Niñirola., M. J. Vicente., J. Ochoa., S. Bañón., and J. A. Fernández. 2009. The influence of nitrate/ammonium ratio on yield quality and nitrate, oxalate and vitamin c content of baby leaf spinach and bladder campion plants grown in a floating system. *Acta Hortic.* 843: 269-274.
- Contreras-Angulo, L. A., J. B. Heredia., C. E. Sánchez-Álvarez., M. Á. Angulo-Escalante., and M. Villarreal-Romero. 2011. Efecto del genotipo y sales de calcio en la calidad de tomates frescos cortados. *Rev Chapingo Ser Hortic.* 17(spe1): 39-45.
- Correia, M., A. Barroso, M.F. Barroso, D. Soares, M.B.P.P. Oliveira y C. Delerue-Matos. 2010. Contribution of different vegetable types to exogenous nitrate and nitrite exposure. *Food Chem.* 120: 960-966.
- Cruz-Crespo, E., A. Can-Chulim., R. Bugarín-Montoya., J. Pineda-Pineda., R. Flores-Canales., P. Juárez-López., y G. Alejo-Santiago. 2014. Concentración nutrimental foliar y crecimiento de chile serrano en función de la solución nutritiva y el sustrato. *Rev. Fitotec. Mex.* 37: 289-295.

- Cruz-Crespo, E., M. Sandoval Villa., V. H. Volke Haller., Á. Can-Chulim., y J. Sánchez Escudero. 2012. Efecto de mezclas de sustratos y concentración de la solución nutritiva en el crecimiento y rendimiento de tomate. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3(7): 1361-1373.
- Currey, C.J., K. J. Walters., and N. J. Flax. 2019. Nutrient solution strength does not interact with the daily light integral to affect hydroponic cilantro, dill, and parsley growth and tissue mineral nutrient concentrations. *Agronomy.* 9 (7): 389.
- D'Anna, F., G. Incalcaterra., A. Moncada., and A. Miceli. 2003. Effects of different electrical conductivity levels on strawberry grown in soilless culture. *Acta Hortic.* 609: 355-360.
- Ding, X., Y. Jiang., H. Zhao., D. Guo., L. He., F. Liu., Q. Zhou., D. Nandwani., D. Hui., and J. Yu. 2018. Electrical conductivity of nutrient solution influenced photosynthesis, quality, and antioxidant enzyme activity of pakchoi (*Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis*) in a hydroponic system. *PLOS ONE.* 13(8): e0202090.
- Fahey, J. W. 2016. Brassica: Characteristics and Properties. In *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 469-477). Elsevier Inc.
- Falovo, C., Y. Roupheal., E. Rea., A. Battistelli., and G. Colla. 2009. Nutrient solution concentration and growing season affect yield and quality of *Lactuca sativa* L. var. *acephala* in floating raft culture. *J. Sci. Food Agric.* 89(10): 1682–1689.
- Fordham, R., and P. Hadley. 2003. Vegetables of temperate climates | Oriental Brassicas. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition.* Second Edition. (pp. 5938-5941).
- Frerichs, C., D. Daum., and R. Koch. 2019. Influence of nitrogen form and concentration on yield and quality of pot grown basil. *Acta Hortic.* 1242 (29): 209-216.
- Gayosso-Rodríguez, S., L. Borges-Gómez., E. Villanueva-Couoh., M. A. Estrada-Botello., y R. Garruña. 2018. Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas. *Agrociencia.* 52 (4): 639-652.
- González García, J. L., M. N. Rodríguez Mendoza., P. Sánchez García., y E. A. Gaytán Acuña. 2009. Relación amonio / nitrato en la producción de hierbas aromáticas en hidroponía. *Agric. Téc. Méx.* 35(1): 5-11.
- González Solano, K. D., M. N. Rodríguez Mendoza., L. I. Trejo Téllez., J. L. García Cué., y J. Sánchez Escudero. 2013. Efluente y té de vermicompost en la producción de hortalizas de hoja en sistema NFT. *Interciencia.* 38(12): 863-869.
- Hernández-Pérez, A., O. G. Villegas-Torres., L. A. Valdez-Aguilar., I. Alía-Tejacal., V. López-Martínez., y M. L. Domínguez-Patiño. 2015. Tolerancia de lisianthus (*Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinn.) a elevadas concentraciones de amonio en la solución nutritiva. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6(3): 467-482.
- Huang, J., L. Chen., M. L. Weng., S. R. Guo., Z. Wu., and S. J. Li. 2010. Effects of different concentrations nutrient solution on the growth, quality and absorption of main mineral macro-elements of *brassica campestris* ssp. *chinensis* in substrate culture. *Acta Hortic.* 856: 221-228.

- Ikeda, H. 2007. Environment-friendly soilless culture and fertigation technique. *Acta Hortic.* 761: 363–369.
- Ishida, M., M. Hara., N. Fukino., T. Kakizaki., and Y. Morimitsu. 2014. Glucosinolate metabolism, functionality and breeding for the improvement of Brassicaceae vegetables. *Breed. Sci.* 64(1): 48-59.
- Juárez-Rosete, C. R., J. A. Aguilar-Castillo., C. A. Aburto-González., y G. Alejo-Santiago. 2019. Producción de biomasa, requerimiento nutrimental de nitrógeno, fósforo y potasio, y concentración de la solución nutritiva en orégano. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 25(1): 17-28.
- Juárez-Rosete, C. R., A. Olivo-Rivas., J. A. Aguilar-Castillo., R. Bugarín-Montoya., and B. G. Arrieta-Ramos. 2014. Nutrition assessment of N-P-K in mint (*Mentha spicata* L.) cultivated in soilless system. *Annu. Res. Rev. Biol.* 4(15): 2462-2470.
- Kang, J.-Y., H.-H. Lee., and K.-H. Kim. 2004. Physical and chemical properties of inorganic horticultural substrates used in korea. *Acta Hortic.* 644: 237-241.
- Kazaz, S., S. Yılmaz., and B. Sayın. 2009. Comparison of soil and soilless cultivation of carnation in sparta province. *Acta Hortic.* 807: 547-552.
- Kotsiras, A., C. M. Olympios., J. Drosopoulos., and H. C. Passam. 2002. Effects of nitrogen form and concentration on the distribution of ions within cucumber fruits. *Sci. Hortic.* 95(3): 175–183.
- Kowalczyk, K., M. Mirgos., K. Bączek., M. Niedzińska., and M. Gajewski. 2016. Effect of different growing media in hydroponic culture on the yield and biological quality of lettuce (*Lactuca sativa* var. *capitata*). *Acta Hortic.* 1142: 105-110.
- Lara-Izaguirre, A. Y., A. N. Rojas-Velázquez., M. J. Romero-Méndez., H. M. Ramírez-Tobías., E. Cruz-Crespo., J. A. Alcalá-Jáuregui., y C. Loredó-Ostí. 2019. Crecimiento y acumulación de NO₃⁻ en lechuga hidropónica con relaciones nitrato/amonio en dos estaciones de cultivo. *Rev. Fitotec. Mex.* 42(1): 21-29.
- Liu, C.-W., Y. Sung., B.-C. Chen., and H.-Y. Lai. 2014. Effects of nitrogen fertilizers on the growth and nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 11(4): 4427–4440.
- Liu, W., S. Li., and D. Chen. 2003. Effects of organic nutrient solution on growth and quality of pak-choi under soilless culture. *Acta Hortic.* 627: 139-144.
- López, E. J. 2018. Hydroponic production of crops. *Idesia.* 36(2): 139-141.
- López-Ordaz, A., G. A. Baca-Castillo., y Y. L. Fernández-Pavía. 2011. Soluciones nutritivas para inducir cambios de concentración de N, P, K en plantas de mango. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2(6): 867-883.

- Lucarini, M., L. D'Evoli., S. Tufi., P. Gabrielli., S. Paoletti., S. Di Ferdinando., and G. Lombardi-Boccia. 2011. Influence of growing system on nitrate accumulation in two varieties of lettuce and red radicchio of Treviso. *J. Sci. Food Agric.* 92(14): 2796–2799.
- Magalhães, J. R., and D. M. Huber. 1989. Ammonium assimilation in different plant species as affected by nitrogen form and pH control in solution culture. *Fertilizer Research* 21: 1-6.
- Magdaleno-Villar, J. J., A. Peña-Lomelí., R. Castro-Brindis., A. M. Castillo-González., A. Galvis-Spínola., F. Ramírez-Pérez., y B. Hernández-Hernández. 2006. Efecto de soluciones nutritivas sobre el desarrollo de plántulas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 12(2): 223-229.
- Marschner, H., and P. Marschner. 2012. Marschner's mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press.
- Maucieri, C., C. Nicoletto., E. V. Os., D. Anseeuw., R. V. Havermaet., and R. Junge. 2019. Hydroponic Technologies. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, and G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future* (pp. 77-110). Springer International Publishing.
- Mickens, M. A., M. Torralba., S. A. Robinson., L. E. Spencer., M. W. Romeyn., G. D. Massa., and R. M. Wheeler. 2019. Growth of red pak choi under red and blue, supplemented white, and artificial sunlight provided by LEDs. *Sci. Hortic.* 245: 200–209.
- Mills, H. A., and J. B. Jones. 1996. *Plant analysis handbook II*. Athens, Georgia: MicroMacro Publishing Inc. (pp. 1-422).
- Morales-Maldonado. E. R., y F. Casanova-Lugo. 2015. Mezclas de Sustratos Orgánicos e Inorgánicos, Tamaño de Partícula y Proporción. *Agron. Mesoam.* 26(2): 365-372.
- Muchecheti, F., I. C. Madakadze., and P. Soundy. 2016. Leaf chlorophyll readings as an indicator of nitrogen status and yield of spinach (*Spinacia oleracea*L.) grown in soils amended with *Luecaena leucocephala* prunings. *J. Plant Nutr.* 39(4): 539–561.
- Neugart, S., S. Baldermann., F. S. Hanschen., R. Klopsch., M. Wiesner-Reinhold., and M. Schreiner. 2018. The intrinsic quality of brassicaceous vegetables: How secondary plant metabolites are affected by genetic, environmental, and agronomic factors. *Sci. Hortic.* 233: 460-478.
- Nicola, S., J. Hoeberechts., and E. Fontana. 2005. Comparison between traditional and soilless culture systems to produce rocket (*eruca sativa*) with low nitrate content. *Acta Hortic.* 697: 549-555.
- NMX-FF-058-SCFI-2006. Norma Mexicana (2006). Productos alimenticios no industrializados para consumo humano – fruta fresca – mango (*mangifera indica* l.) – especificaciones (CANCELA A LA NMX-FF-058-SCFI-1999).
- Ortega-Blu, R., M. M. Martínez-Salgado., P. Ospina., A. M. García-Díaz., and P. Fincheira. 2020. Nitrate concentration in leafy vegetables from the central zone of Chile: Sources and environmental factors. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 20: 964-972.

- Parks, S and C. Murray. 2011. Leafy Asian vegetables and their nutrition in hydroponics. Industry & investment NSW. First published. (pp. 1-21).
- Pathirana, I., P. Thavarajah., N. Siva., A. N. K. Wickramasinghe., P. Smith., and D. Thavarajah. 2017. Moisture deficit effects on kale (*Brassica oleracea* L. var. *Acephala*) biomass, mineral, and low molecular weight carbohydrate concentrations. *Sci. Hortic.* 226: 216-222.
- Pérez-Vázquez, E. L., J. M. Gaucín-Delgado., S. C. Ramírez-Rodríguez., M. A. Sariñana-Aldaco., G. Sifuentes., y E. Zúñiga-Valenzuela. 2020. Conductividad eléctrica de la solución nutritiva efecto en el rendimiento y la calidad nutracéutica de pimiento morrón. *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 11(7): 1669-1675.
- Perzabal-Ramos, M., E. Sandoval-Castro., R. Díaz-Ruíz., A. Huerta-de la Peña., R. Figueroa-Brito., y F. Bahena-Juárez. 2018. Respuesta de espinaca y de *Spodoptera exigua* a fertilización orgánica y mineral. *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 9: 723-735.
- Pizzorno. J. E., M. T. Murray., H. Joiner-Bey. 2016. Parkinson's disease. The clinician's Handbook of Natural Medicine. 3er edition. (pp. 749-765).
- Ramírez-Martínez, M., L. I. Trejo-Téllez., F. C. Gómez-Merino., P. Sánchez-García., M. N. Rodríguez-Mendoza., y M. Sandoval-Villa. 2009. Relaciones de potasio / calcio de la solución nutriente sobre el estado nutriente del tulipán. *Acta Hortic.* 843: 119-122.
- Reglamento (UE) N° 1258/2011. Diario Oficial de la Unión Europea, 02 de diciembre de 2011.
- Resh, H. M. 2006. Cultivos hidropónicos. Ediciones Mundi-Prensa. 5ta edición. España.
- Reyes-Munguía. A., L. Rosas-Trejo., R. Campo-Montiel., A. Quintero-Lira., y M. L. Carrillo-Inungaray. 2017. Propiedades antioxidantes del extracto acuoso de *Brassica oleracea* var. *sabellica*. *J. Environ. Sci. Nat. Resour.* 3 (8): 30-34.
- Rivera-Espejel, E. A., M. Sandoval-Villa., M. N. Rodríguez-Mendoza., C. Trejo-López., y R. Gasga-Peña. 2014. Fertilización de tomate con nitrato y amonio en raíces separadas en hidroponía. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 20: 57-70.
- Rodríguez Ledesma, N., C. N. Torres Sevillano., M. E. Chaman Medina y J. E. M. Hidalgo Rodríguez. 2019. Efecto del estrés salino en el crecimiento y contenido relativo del agua en las variedades IR-43 y amazonas de *Oryza sativa* "arroz" (Poaceae). *Arnaldoa* 26 (3): 931-942.
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Salsac, L., S. Chaillou., J. F. Morot-Gaudry., C. Lesaint., E. Jolivoie. 1987. Nitrate and ammonium nutrition in plants. *Plant Physiol. Biochem.* 25: 805-812.
- Samarakoon, U. C., C. Fyffe., J. Bale., P. Ling., S. Basnagala., N. Donley., and J. Altland. 2019. Effect of electrical conductivity on the productivity and nutrient uptake of *Lactuca sativa* L. grown using nutrient film technique (NFT). *Acta Hortic.* 1266: 137-144.

- Samarakoon, U.C., P. A. Weerasinghe., and A. P. Weerakkody. 2006. Effect of Electrical Conductivity [EC] of the Nutrient Solution on Nutrient Uptake, Growth and Yield of Leaf Lettuce (*Lactuca sativa L.*) in Stationary Culture. *Tropical Agricultural Research*: 18(1): 13-21.
- Santamaria, P. 2005. Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. *J. Sci. Food Agric.* 86(1): 10–17.
- SAS Institute Inc. (2017). *Statistical Analysis System (SAS)*, version 9.4 SAS Institute Inc Cary NC., USA.
- Scuderi, D., F. Giuffrida., and C. Leonardi. 2013. Effects of harvest time and plant density on yield and quality of chinese cabbage for fresh-cut production. *Acta Hort.* 1005: 503-509.
- Scuderi, D., F. Giuffrida., and G. Noto. 2009. Effects of nutrient solution EC on yield, quality and shelf-life of lettuce grown in floating system. *Acta Hort.* 807: 221-226.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2020. *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola-2020*.
- Signore, A., F. Serio., and P. Santamaria. 2016. A targeted management of the nutrient solution in a soilless tomato crop according to plant needs. *Front. Plant Sci.* 7:391.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil.* 15(2): 134-154.
- Steiner, A. A. 1968. Soilless culture. In *Proc. 6th Colloq. Int. Potash Inst. Florence, Italy.* pp. 324-341.
- Steiner, A. A. 1980. The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. *Acta Hort.* 98: 87-98.
- Steiner, A. A. 1984. *The Universal Nutrient Solution.* Sixth International Congress on Soilless Culture. Wageningen. 633-650.
- Swan, B., and B. Bugbee. 2017. Increasing blue light from LEDs reduces leaf length in kale. *Acta Hort.* 1174: 175-178.
- Tabatabaei, S. J., L. S. Fatemi., and E. Fallahi. 2006. Effect of ammonium: nitrate ratio on yield, calcium concentration, and photosynthesis rate in strawberry. *J. Plant Nutr.* 29(7): 1273–1285.
- Tabatabaie, S. J., J. Nazari., H. Nazemiyeh., S. Zehtab., and F. Azarmi. 2007. Influence of various electrical conductivity levels on the growth and essential oil content of peppermint (*menta piperita l.*) grown in hydroponic. *Acta Hort.* 747: 197-201.
- Temple, L. M., and P. Saigal. 2018. Hypothyroidism. *Integrative Medicine.* (pp.347–360).
- Totsch, S. K., M. E. Waite., and R. E. Sorge. 2015. Dietary influence on pain via the immune system. *Progress in Molecular Biology and Translational Science.* 131: 435-469.

- Urbina-Sánchez, E., A. Cuevas-Jiménez., J. C. Reyes-Alemán., G. Alejo-Santiago., L. A. Valdez-Aguilar., and L. M. Vázquez-García. 2020. Solución nutritiva adicionada con NH_4^+ para producción hidropónica de chile huacle (*Capsicum annuum* L.). Rev. Fitotec. Mex. 43(3): 291-291.
- Urlić, B., M. Jukić Špika., C. Becker., H.-P. Kläring., A. Krumbein., S. Goreta Ban., and D. Schwarz. 2017. Effect of NO_3^- and NH_4^+ concentrations in nutrient solution on yield and nitrate concentration in seasonally grown leaf lettuce. Acta Agric. Scand B Soil Plant Sci. 67(8): 748–757.
- Urrestarazu, G. M. 2015. Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía. Editorial Mundi-Prensa.
- Uscola, M. 2014. Ecofisiología del nitrógeno en plantas mediterráneas: Estrategias de absorción de distintas formas químicas de nitrógeno, respuesta funcional y utilización de las reservas para el crecimiento. Ecosistemas. 23 (2):137-142.
- Valencia, E., E. Valenzuela., R. Quevedo., y V. Aedo. 2015. Determinación del contenido de nitratos y nitritos en brócoli (*Brassica oleracea* var. *Italica*) comercializados en la Ciudad de Osorno, Chile. Inf. Tecnol. 26(3): 41-46.
- Valenzuela López, M., L. Partida Ruvalcaba., T. Díaz Valdés., T. J. Velázquez Alcaraz., G. Bojórquez Bojórquez., y T. Enciso Osuna. 2014. Respuesta del tomate cultivado en hidroponía con soluciones nutritivas en sustrato humus de lombriz-fibra de coco. Rev. Mex. Cienc. Agric. 5(5): 807-818.
- Wang, J., Y. Zhou., C. Dong., Q. Shen., and R. Putheti. 2009. Effects of $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ ratios on growth, nitrate uptake and organic acid levels of spinach (*Spinacia oleracea* L.) Afr. J. Biotechnol. 8 (15): 3597-3602.
- Warwick S.I., A. Francis., and I. A. Al-Shehbaz. 2019. Brassicaceae species checklist and database (version 2, Oct 2009). In: Species 2000 & ITIS Catalogue of Life, 2019 Annual. Digital resource at www.catalogueoflife.org/annual-checklist/2019. Species 2000: Naturalis, Leiden, the Netherlands. ISSN 2405-884X.
- Wenceslau, D. de S. L., D. F. de Oliveira., H de O. Rabelo., G. F. Ferbonink., L. A. A. Gomes., E. C. A. Leonel., and G. Caione. 2021. Nitrate concentration and nitrate/ammonium ratio on lettuce grown in hydroponics in Southern Amazon. Afr. J. Agric. Res. 17(6): 862-868.
- Wong, Y. C., X. H. Wang., and M. T. Ling. 2003. Prostate development and carcinogenesis. International Review of Cytology. 227: 65-130.
- Xing S., J. Wang., Y. Zhou., S. A. Bloszies., C. Tu and S. Hu. 2015. Effects of $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ ratios on photosynthetic characteristics, dry matter yield and nitrate concentration of spinach. Exp. Agric. 51:151-160.
- Yang, T., U. Samarakoon., J. Altland., and P. Ling. 2021. Photosynthesis, biomass production, nutritional quality, and flavor-related phytochemical properties of hydroponic-grown

- arugula (*Eruca sativa* mill.) 'Standard' under different electrical conductivities of nutrient solution. *Agronomy*. 11 (7): 1340.
- Yost, J. O. 2021. Determining effects of nutrient solution electrical conductivity and daily light integral on the growth of specialty leafy greens. Graduate Theses and Dissertations. 18642.
- Zheng, Y., T. Zhang., H. Liu., Y. Li., Y. Liu., Y. Hao., and B. Lei. 2018. Supplemental blue light increases growth and quality of greenhouse pak choi depending on cultivar and supplemental light intensity. *J. Integr. Agric.* 17: 2245-2256.