

Impacto del hierro, magnesio y manganeso en la clorosis de la arúgula en sistemas hidropónicos

MIGUEL ÁNGEL BAZÁN RAMÍREZ ¹
ALFREDO SALOMÓN RODRÍGUEZ DELFÍN ²
WILFREDO BAZÁN RAMÍREZ ³
NAIN CHAVEZ CABRERA ⁴

RECIBIDO: 09/09/2022 ACEPTADO: 17/10/2022 PUBLICADO: 31/12/2022

RESUMEN

En el cultivo de arúgulas vía hidroponía, la deficiencia de hierro (Fe), en comparación con las deficiencias de magnesio (Mg) y manganeso (Mn), es un factor importante que ocasiona la clorosis de sus hojas. En el presente estudio se aplicó un diseño experimental, donde se usaron bloques completos al azar con cuatro grupos conformados por seis plantas cada uno: tres grupos experimentales (GE) y un grupo control (GC). Se tomaron las precauciones para que las variables intervinientes como la oxigenación artificial y el tiempo no afectaran el resultado del experimento. Los resultados obtenidos muestran que la deficiencia de Fe, Mg y Mn en cada tratamiento influye en la aparición de clorosis en las hojas. Asimismo, se evidencia que la escasez de oxigenación y el exceso de macronutrientes influyen en la clorosis y necrosis de las arúgulas respectivamente.

Palabras clave: arúgula; clorosis; deficiencia de Fe, Mg y Mn; huertos hidropónicos; tratamiento.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como objetivo determinar el impacto del hierro (Fe), magnesio (Mg) y manganeso (Mn) en el color de las hojas de las arúgulas cultivadas en un sistema hidropónico con el fin de evitar la presencia de clorosis en esta planta y de mantener sus características organolépticas como su verdor, tamaño y peso adecuado. En estos tiempos críticos por el crecimiento de la población (que necesita satisfacer su demanda alimenticia con cultivos de gran calidad y que beneficien su salud) la arúgula se presenta como una buena alternativa.

Ante esto, Sturm y Wagner (2017) sostienen que el alto consumo de vegetales pertenecientes a la familia *Brassicaceae* (como la arúgula) está relacionado con una menor incidencia de enfermedades crónicas (incluyendo diferentes tipos de cáncer) debido a los glucosinolatos (GLS) —compuestos vegetales secundarios que contienen azufre y que están presentes casi exclusivamente en *Brassicaceae*— y, en particular, a sus productos de degradación bioactivos, incluidos los isotiocianatos (ITC), pues son beneficiosos para la salud y poseen propiedades anticancerígenas y antiinflamatorias. Marchioni et al. (2021) sostienen que las arúgulas adultas se componen principalmente de isotiocianatos, especialmente de 4-(metiltio)butil isotiocianato y nitrilos.

1 Ingeniero agroindustrial por la Universidad Nacional Federico Villarreal. Actualmente, es consultor independiente (Lima, Perú).

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2554-3381>

E-mail: 2017045465@unfv.edu.pe

2 Doctor en Ciencias e Ingeniería Biológica por la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Actualmente, es profesor principal del Departamento de Biología, Facultad de Ciencias de la UNALM (Lima, Perú).

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8515-4257>

E-mail: delfin@lamolina.edu.pe

3 Doctor en Gestión de Empresas por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Actualmente, es profesor auxiliar del Departamento de Administración de la Facultad de Ciencias Administrativas de la UNMSM y analista en Telefónica del Perú S.A.A (Lima, Perú).

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2685-8254>

Autor de correspondencia: wbazanr@unmsm.edu.pe

4 Bachiller de Nutrición Humana por la Universidad Norbert Wiener. Actualmente, es consultora independiente (Lima, Perú).

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1349-1817>

E-mail: a2017200411@uwiener.edu.pe

Sin embargo, la industrialización de los alimentos obliga la aceleración de las cosechas, donde se observa el uso desproporcionado de insecticidas y compuestos químicos para combatir las plagas, lo que maltrata la tierra y los productos alimenticios y, por consiguiente, ocasiona daños en la salud de las personas.

Como alternativa de solución para esta problemática, se proponen sistemas de cultivos de hidroponía que, para Beltrano y Giménez (2015), integran técnicas que permiten a las plantas contar con nutrientes, estar alejadas del suelo y conservar condiciones de humedad y temperatura que permitan un buen desarrollo.

Jordan et al. (2018) estudiaron las lechugas cultivadas en los sistemas acuapónicos e hidropónicos, las cuales obtuvieron mayores rendimientos al utilizar sustratos compuestos con fibra de cáscara de coco.

Gruda (2019) agrega que el cambio de un sistema de cultivo con suelo a uno sin suelo hará más eficiente el uso del agua, especialmente en sistemas de circuito cerrado con una solución de agua/nutrientes recirculantes que recupera el agua de drenaje para su reutilización. Por otra parte, Cordeiro et al. (2019) destacan que, en la hidroponía, para la elaboración de la solución nutritiva y su éxito en los cultivos de arúgulas, el agua a utilizar debe ser de alta calidad. El uso adecuado del agua y la

ausencia de plaguicidas en los cultivos reduce el tiempo de cosecha. A esto, Sánchez-Del Castillo et al. (2021) agregan que los cultivos en hidroponía adecuadamente gestionados son diez veces más productivos que los cultivos en campo abierto.

Diversas instituciones en el mundo dedicadas a la investigación de cultivos utilizan la hidroponía. La Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) hace uso de esta técnica en su huerto hidropónico con diversos productos agrícolas. Es en este contexto que se estudió a la arúgula o rúcula (*Eruca sativa*), beneficiosa para la salud de nuestra sociedad, donde es necesario controlar la clorosis de esta planta para obtener un verdor, tamaño y peso adecuado en la cosecha (ver Figura 1).

La clorosis en la arúgula tiene diversas causas. La falta de Fe, Mg y Mn puede ocasionar que las arúgulas tengan hojas amarillas y en mal estado (ver Figura 2), con pesos y tamaños debajo del estándar. Esto ocasiona pérdidas a los agricultores dedicados a cultivar esta planta.

Rodríguez y Flórez (2004) sostienen que los macronutrientes y micronutrientes absorbidos por las plantas son de vital importancia y son un total de 17; entre ellos, están el oxígeno, hidrógeno y carbono (que provienen del agua, del dióxido de carbono y del aire), así como los nutrientes minerales. Además, en los tejidos de las plantas se hallaron concentraciones por encima del 0.1 % en peso seco de



Figura 1. Hojas de arúgula en huerto hidropónico.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Plantas de arúgula hidropónica con deficiencias.

Fuente: Elaboración propia.

macronutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. Los autores mencionaron que los micronutrientes son necesarios en concentraciones por debajo de 100 $\mu\text{g/g}$ de peso seco.

Silva et al. (2017) realizaron un estudio sobre deficiencia de nutrientes en el que hicieron hincapié en la descripción de los síntomas de deficiencia de macronutrientes en pimientos; los autores determinaron que la ausencia de macronutrientes como potasio y magnesio causaron clorosis y necrosis en las hojas.

En experimentos sobre clorosis por deficiencia de hierro (IDC, por sus siglas en inglés) para soya en suelos alcalinos, Santos et al. (2021) concluyeron que la aplicación de quelatos de hierro sintéticos es la más utilizada en la enmienda de IDC. Para medir el efecto de la aplicación de quelatos de hierro para el tratamiento de la clorosis, se midieron los valores de SPAD en cada etapa fenológica consecutiva, de V1 a V5.

Diversos autores como Aslani y Souri (2018), Ahmadi y Souri (2018) y Riaz y Guerinot (2021) han estudiado la importancia del hierro en las plantas y han llegado a la conclusión de que el hierro es

necesario para los procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la síntesis de clorofila, la fijación de nitrógeno, la respiración, la activación enzimática y la transferencia de electrones. Es decir, la deficiencia de hierro puede interrumpir estos procesos a diferentes velocidades y niveles.

En su investigación sobre la arúgula, Flores et al. (2014) determinaron que el aumento de la población influyó en la exigencia de alimentos naturales de calidad y con altos valores nutricionales.

El alcance de esta investigación es exploratorio, pues son escasos los estudios sobre las deficiencias en la arúgula y su influencia en la calidad de esta planta cultivada por medio del sistema hidropónico. El propósito es solucionar problemas relacionados con la clorosis en las hojas de las arúgulas cultivadas en hidroponía y, por consiguiente, pretende contribuir en el debate académico para coadyuvar con investigaciones en productos anticancerígenos. La investigación presenta un alcance social, pues una alimentación saludable que incluya vegetales como las arúgulas, que contienen carotenoides y tienen propiedades nutricionales antioxidantes, es una alternativa beneficiosa para la salud del hombre. Por último, tiene un alcance económico, pues

su bajo costo y necesidad de poco espacio convierten a la arúgula en una alternativa de cultivo para las personas de bajos recursos, pero también se pueden iniciar proyectos de inversión en el negocio agroindustrial.

Para esta investigación, se establecieron cuatro objetivos: 1) Determinar si las medias de dS/m de la conductividad eléctrica son diferentes en los cuatro tratamientos, 2) determinar si las medias del tamaño de hojas son diferentes en los cuatro tratamientos, 3) determinar si las medias del peso fresco (en gramos) de la planta son diferentes en los cuatro tratamientos y 4) determinar si las medias del peso seco de las plantas en gramos son diferentes en los cuatro tratamientos.

Hipótesis de investigación

Se plantearon las siguientes hipótesis:

1. Las medias de dS m de la conductividad eléctrica son diferentes en los cuatro tratamientos.
2. Las medias del tamaño de hojas son diferentes en los cuatro tratamientos.
3. Las medias del peso fresco de la planta en gramos son diferentes en los cuatro tratamientos.
4. Las medias del peso seco de las plantas en gramos son diferentes en los cuatro tratamientos.

METODOLOGÍA

Ámbito temporal

Para esta investigación, las plantas de arúgula se cultivaron en febrero de 2019. El experimento se desarrolló en marzo de ese año y tuvo una duración de 30 días.

Ámbito espacial

Este experimento se llevó a cabo en un huerto hidropónico de una universidad nacional en el distrito de La Molina, Lima, geográficamente ubicada en 12°04'55" de latitud sur y 76°56'53" de longitud oeste, a 243.7 msnm, y corresponde a la zona denominada desierto desecado subtropical (dd-S). La temperatura anual promedio en esta zona es de 20 °C, con una humedad relativa promedio de 84 % y con precipitaciones anuales de 11.9 mm. El huerto posee condiciones adecuadas para el sombreado, humedad relativa y fuerza del viento. La línea de investigación de este trabajo es «cultivos hidropónicos».

Tipo y diseño de investigación

La investigación es de tipo aplicada y su nivel es relacional, debido a que vincula las variables de la forma causa-efecto. El diseño es experimental, dado que se manipula la variable independiente, a fin de observar su influencia en la variable dependiente. Es de enfoque cuantitativo, debido a que los resultados son cantidades. Dos de sus variables agronómicas fueron transversales y dos longitudinales.

Población y muestra

En este experimento, se utilizó la planta de la arúgula común. La población estuvo compuesta por 150 plántulas de arúgulas del huerto hidropónico de la UNALM.

Se seleccionó una muestra de 24 arúgulas, considerando seis repeticiones por cuatro tratamientos, aunque, en investigaciones experimentales, se suele utilizar de tres a cuatro repeticiones.

Instrumentos materiales

En la fase de almácigos se utilizaron: una caja de frutas de 60 cm de largo, 40 cm de ancho y 15 cm de alto; 12 m³ de arena gruesa; 10 m de plástico negro; un microfilm de 5 cm de largo por 0.5 cm de diámetro, y una malla de 1 cm². En la fase de post-almácigo se utilizaron: un peachímetro para medir el grado de acidez en una solución; un conductímetro para medir el CEE; una probeta de 1 L de capacidad; una caja de frutas de 60 cm de largo, 40 cm de ancho y 15 cm de alto; una plancha de tecnopor de 1" de espesor; 30 vasos de plástico de 1 oz; 30 esponjas de 1 cm², y una jarra medidora de 1 L.

En el segundo trasplante NFT se utilizaron 20 tubos de plástico de 15 m de largo y 3" de diámetro, un sistema de tuberías de distribución de 1", una llave de paso de 1", un caballete de fierro y seis mangueras microfilm de 5 cm de largo por 0.5 cm de diámetro.

En la etapa del experimento se utilizó una probeta de 1 L, un ciento de hojas A4, una regla de 30 cm, dos bolígrafos, 24 macetas de plástico con una capacidad de 2 L cada uno, 24 tapas de tecnopor circular de 5 cm de diámetro, 24 llaves de plástico, 24 conductores de agua para motores de peceras de 10 cm de largo por 0.5 cm de diámetro, 24 bolsas de papel Kraft y 1.6 L de agua por cada maceta. También se utilizó un cuaderno de 100 hojas que fue usado como diario y notas de campo.

Equipos

En la etapa de NFT se utilizó un tanque de polietileno con una capacidad de 1000 L para un área de 100 m² y una electrobomba de 0.5 HP centrífuga de 80 L por minuto.

En la etapa del experimento se utilizaron tres motores de pecera, una balanza digital, una balanza electrónica, un horno para secado, una calculadora y computadora portátil HP.

Solución nutritiva

En la etapa de experimento, se utilizó la solución nutritiva hidropónica La Molina, como proponen Caso et al. (2010), cuyos componentes son la solución concentrada A, compuesta por N, P, K y Ca, y la solución concentrada B, compuesta por Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo y Cl. La etapa de almácigo tuvo un tiempo de duración de 15 días y la dosis utilizada fue de 5 ml de solución A por 1 L de agua y 2 ml de solución B por 1 L de agua. En la fase posterior al almácigo, la duración fue de 6 días y la dosis utilizada fue de 3 ml de solución A por 1 L de agua y 2 ml de solución B por 1 L de agua. El trasplante definitivo tuvo una duración de 9 días en los que se aplicaron dosis de 5 ml de solución A por 1 L de agua y 2 ml de solución B por 1 L de agua.

En la segunda etapa del experimento, se hizo una división de cuatro grupos con seis macetas de 1.6 L en cada uno. El tiempo de duración fue de 30 días y se desarrolló el tratamiento de las deficiencias de control de Fe, Mg y Mn.

En el GC se utilizaron 3 ml de solución A por 1 L de agua, por lo tanto, 4.8 ml por maceta y 2 ml de solución B por 1 L de agua, lo que corresponde a 3.2 ml por maceta.

En el grupo con deficiencia de hierro se utilizaron todos los nutrientes con excepción de hierro de la siguiente manera: 3 ml de solución A por 1 L de agua, es decir, un total de 4.8 ml por maceta; 1 ml de sulfato de magnesio; 1 ml de sulfato de manganeso, y 1 ml de micronutrientes.

En el grupo con deficiencia de magnesio se utilizaron todos los nutrientes a excepción del magnesio de la siguiente manera: 3 ml de solución A por 1 L de agua, es decir, un total de 4.8 ml por maceta; 1 ml de quelato de hierro; 1 ml de sulfato de manganeso; y 1 ml de micronutrientes

Por último, en el grupo con deficiencia de manganeso se utilizaron todos los nutrientes a excepción del manganeso de la siguiente manera: 3 ml de

solución A por 1 L de agua, es decir, un total de 4.8 ml por maceta; 1 ml de sulfato de magnesio; 1 ml de quelato de hierro y 1 ml de micronutrientes.

Procedimiento

Se seleccionaron al azar 24 plantas y se dividieron en cuatro grupos, a razón de seis plantas por grupo (tres experimentales y uno control), en un área de 1.6 m² de parcela, con una hilera y una planta por unidad experimental. El área total del experimento fue de 2.5 m².

Acondicionamiento

Se humedeció el sustrato de partículas con la solución nutritiva hidropónica La Molina, como hicieron Caso et al. (2010), con 5 ml de A y 2 ml de B por 1 L de agua. Posteriormente, se inició la etapa de almácigos donde se colocaron los sustratos, con un volumen de 12 m³, en una caja de frutas de 60 cm de largo por 40 cm de ancho. Luego se trazó 8 surcos con distancias de 5 cm y una profundidad de 1 cm. En el día 1 se inició la siembra de semillas colocadas en cada hilera, después se las cubrió con los sustratos, y luego se inició el riego solo con agua por 5 días. A partir del día 6 y hasta el día 10, se regó con una concentración de solución al 50 % y, finalmente, desde el día 11 al 15, se hizo el riego al 100 % de concentración de la solución nutritiva.

La etapa de post-almácigo tuvo una duración de 6 días e inició con el trasplante de plantas seleccionadas, cuyas raíces fueron lavadas cuidadosamente y los cuellos de las plántulas fueron cubiertas con un pedazo de esponja, por separado, para ser sujetadas en el orificio del tecnopor, para que las raíces estuvieran sumergidas con la solución nutritiva durante 15 días, como hicieron Caso et al. (2010). Sin embargo, esa duración de tiempo ocasionó el quemado químico de las plántulas por falta de oxigenación correcta pues estas sufrieron estrés hídrico. Se decidió reducir el proceso a 5 días ya que las raíces se habían desarrollado y estaban preparadas para ser trasladadas al sistema NFT donde la oxigenación es mecánica.

Caso et al. (2010), también proponen dosis de 5 ml de solución A y 2 ml de solución B, pero se redujeron 2 ml de A, debido a que los elementos químicos que la componen tenían alta concentración de sales que provocaban el quemado de las plántulas por el estrés hídrico.

Se comprobó que las plantas de arúgula son sensibles cuando el oxígeno escasea y, para solucionar esta restricción, se colocaron en cada maceta,

motores de pecera. La etapa experimental tuvo una duración de 30 días y fueron seleccionadas 24 plantas que se distribuyeron aleatoriamente. Luego, se prepararon todas las soluciones nutritivas del grupo control y las tres soluciones nutritivas con deficiencias de Fe, Mg y Mn. Finalmente, se acondicionaron las 24 macetas divididas en 4 grupos y se añadieron 1.6 L de solución en cada maceta con sus respectivos conductos de oxígeno unidos al motor para peceras.

Transcurridos 60 días de iniciada la siembra, se realizó la cosecha de las 24 plantas. Se hicieron las mediciones y el pesado correspondiente para, posteriormente, secarlas en una estufa industrial. Al día siguiente de la cosecha, se colocaron en bolsas papel Kraft, 24 muestras de raíces y 24 muestras de hojas que fueron introducidas en el horno industrial a una temperatura de 95 °C. Finalmente, se pesaron los 24 pares.

RESULTADOS

Se evaluaron las muestras considerando conductividad Eléctrica (CEE), tamaño de hojas, peso fresco y peso seco de la planta. En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos.

La Tabla 2 muestra los valores resultantes de la prueba de Tukey por cada variable experimental para comparaciones apareadas de medias.

Conductividad eléctrica (CEE)

Los resultados obtenidos para esta variable están contenidos en la Tabla 1. El grupo control que incluyó Fe, Mg y Mn, tiene un promedio de 1.6 dS m (densidad de sales sobre metros).

El tratamiento que corresponde a la deficiencia de hierro tiene la media más alta (1.5 dS m) con respecto a las otras deficiencias (magnesio y manganeso). Esto quiere decir que la deficiencia de

Tabla 1. Valores promedios para cada variable experimental y su p-value.

Variables experimentales	Trat. Control	Trat. deficiencia Fe	Trat. deficiencia Mg	Tat. deficiencia Mn	p-value
CEE en dS m	1.6	1.5	1.13	1.22	0.000
Tamaño de hojas en cm	25.5	15	13.33	12.67	0.000
Peso fresco de la planta en g	93.67	31.67	23.33	35.17	0.000
Peso seco de la planta en g	8.44	3.38	2.87	2.97	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. La prueba de Tukey por cada variable experimental.

Variable dependiente:		CEE	Tamaño_hoja	Peso_fresco	Peso_seco
Tratamiento		Sig.	Sig.	Sig.	Sig.
control	def_Fe	0.377	0.001	0.001	0.001
	def_Mg	0.000	0.000	0.000	0.000
	def_Mn	0.000	0.000	0.001	0.000
def_Fe	control	0.377	0.001	0.001	0.001
	def_Mg	0.000	0.866	0.917	0.960
	def_Mn	0.001	0.705	0.993	0.979
def_Mg	control	0.000	0.000	0.000	0.000
	def_Fe	0.000	0.866	0.917	0.960
	def_Mn	0.531	0.990	0.798	1.000
def_Mn	control	0.000	0.000	0.001	0.000
	def_Fe	0.001	0.705	0.993	0.979
	def_Mg	0.531	0.990	0.798	1.000

La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Fuente: Elaboración propia.

hierro provoca una alta CEE o concentración de sales comparado a la deficiencia de magnesio (cuyo promedio es 1.13 dS m) y a la deficiencia de manganeso (cuyo promedio es 1.22 dS m).

La hipótesis nula (H_0) plantea que las medias de dS m de la CEE son iguales en los cuatro tratamientos. La prueba estadística utilizada fue el análisis de varianza (Anova), el nivel de significancia fue 0.05 y el p -value fue 0.000, tal como se muestra en la Tabla 1. Entonces, si p -value es menor que 0.05, se rechaza la H_0 , al menos una de las medias de los tratamientos es diferente.

En la Tabla 2 se visualiza la prueba de Tukey, para comparaciones apareadas de medias. Los resultados indican que las medias de las muestras de tratamiento control y deficiencia de hierro son iguales; lo mismo sucede con las medias de las muestras con deficiencia de magnesio y deficiencia de manganeso que también son iguales.

Son más efectivos los tratamientos control y deficiencia de hierro para la CEE; el tratamiento control es levemente más efectivo que el tratamiento con deficiencia de Fe.

Tamaño de hojas

En la Tabla 1 se visualiza que, para esta variable experimental, la media del tamaño de las hojas del tratamiento control fue de 25.5 cm, siendo estas las de mayor tamaño. Por otro lado, el tamaño de las hojas que corresponden al tratamiento de deficiencia de hierro tenía un valor esperado de 15 cm; sin embargo, el tratamiento deficiencia de manganeso tuvo el menor tamaño, pues alcanzó un promedio de 12.67 cm.

La hipótesis nula (H_0) plantea que las medias del tamaño de hojas son iguales en los cuatro tratamientos. La prueba estadística utilizada fue Análisis de Varianza (Anova), el nivel de significancia fue 0.05 y el p -value fue 0.000, tal como se muestra en la Tabla 1. Entonces, si p -value es menor que 0.05, se rechaza la H_0 , al menos una de las medias de los tratamientos es diferente.

En la tabla 2 se visualiza la prueba de Tukey para comparaciones apareadas de medias del tamaño de las hojas. Se observa que la media de tratamiento control no es igual a las medias de las deficiencias de Fe, Mg y Mn; sin embargo, se observa que las medias de deficiencia de Fe, Mg y Mn sí son iguales entre estas. Por lo tanto, el tratamiento control es más efectivo con respecto a los otros tratamientos.

Peso fresco de la planta (PFP)

En la Tabla 1 se observan los pesos obtenidos durante la cosecha. El tratamiento control, que contiene Fe, Mg y Mn, tiene el mayor promedio, de 93.67 g, lo que significa que el peso será mayor cuando no existen deficiencias de Fe, Mg y Mn. El segundo mejor resultado lo tuvo el tratamiento 3, que tuvo deficiencia de manganeso con 35.17 g, lo que significa que este elemento no es influyente en el peso fresco final de la arúgula. También se observa en la Tabla 1 que el tratamiento con deficiencia de magnesio resultó en un peso promedio de 23.33 g, es decir, el menor promedio de peso fresco, lo que indica que este elemento es el factor más importante.

La hipótesis nula (H_0) plantea que las medias del peso fresco de la planta (en g) son iguales en los cuatro tratamientos. La prueba estadística utilizada fue Análisis de Varianza (Anova), el nivel de significancia fue 0.05 y el p -value fue 0.000, tal como se muestra en la Tabla 1. Entonces, si p -value es menor que 0.05, se rechaza la H_0 , al menos una de las medias de los tratamientos es diferente.

En la Tabla 2 se visualiza la prueba de Tukey para comparaciones apareadas de medias del peso fresco de las plantas. Se observa que la media de tratamiento control no es igual a las medias de las deficiencias de Fe, Mg y Mn; sin embargo, se observa que las medias de deficiencia de Fe, Mg y Mn sí son iguales entre estas. Por lo tanto, el tratamiento control es más efectivo con respecto a los otros tratamientos.

Peso seco de la planta (PFP)

Después de realizar el secado de las plantas, estas fueron pesadas. El promedio de los tratamientos expresados en g está contenido en la Tabla 1. Se observa que el tratamiento control, que contiene Fe, Mg y Mn, presenta el mayor promedio, 8.44 g, es decir, es el más efectivo. Le sigue el tratamiento con deficiencia de hierro con un valor de 3.38 g de promedio. Por otro lado, el tratamiento con deficiencia de magnesio tiene el promedio más bajo con 2.87 g.

La hipótesis nula (H_0) plantea que las medias del peso seco de las plantas (en g) son iguales en los cuatro tratamientos. La prueba estadística utilizada fue Análisis de Varianza (Anova), el nivel de significancia fue 0.05 y el p -value fue 0.000, tal como se muestra en la Tabla 1. Entonces, si p -value es menor que 0.05, se rechaza la H_0 , al menos una de las medias de los tratamientos es diferente.

En la Tabla 2 se visualiza la prueba de Tukey, para comparaciones apareadas de medias del peso seco de las plantas, indican que la media de tratamiento control y las medias de las deficiencias de Fe, Mg y Mn no son iguales y que las medias de deficiencia de Fe, Mg y Mn si son iguales entre estas. Es más efectivo el tratamiento control con respecto a los otros tratamientos.

DISCUSIÓN

Conductividad eléctrica (CEE)

En los resultados se evidenció que la CEE en el tratamiento control alcanzó en promedio 1.6 dS m en concordancia con los hallazgos de las siguientes investigaciones:

Da Silva et al. (2011) realizaron investigaciones en cultivos de rúculas que fueron sometidos a diferentes niveles de salinidad en cultivo hidropónico NFT, donde se utilizó agua salina subterránea y los residuos de su desalación. Se usaron seis niveles de salinidad (CE del agua de 0.2; 1.2; 2.2; 3.2; 4.2 y 5.2 dS m⁻¹) con tratamientos aleatorizados en una factorial de 6 x 2, con cuatro repeticiones. Asimismo, señalan que, desde su trasplante, las plantas de rúcula fueron evaluadas para la detección visual de síntomas, sin toxicidad ni deficiencias nutricionales resultantes de desequilibrios provocados por sales hasta 12 días después del transplante. Tampoco se registraron síntomas en las plantas sometidas a salinidad de origen subterráneo (aguas salinas).

Sin embargo, los cultivos que fueron sometidos a mayores niveles de salinidad por NaCl mostraron síntomas de clorosis, independientemente de la fuente de sales, pues presentaron hojas cloróticas y, eventualmente, quema de los bordes. Los síntomas producidos por las aguas salinas fueron menos intensos que los síntomas producidos por la fuente de NaCl. Pero, para ambas fuentes, no se detectaron síntomas en plantas sometidas a la salinidad de 1.2 dS m⁻¹, cuyo aspecto fue parecido al de las plantas de tratamiento control (CEa = 0.2 dS m⁻¹). La clorosis fue el síntoma más evidente en las plantas, con mayor predominio en sus bordes, especialmente en los niveles de salinidades superior (CEa = 4.2 y 5.2 dS m⁻¹).

Por otra parte, Carassay et al. (2018) sustentaron la posibilidad de lograr un adecuado rendimiento y alta calidad en las arúgulas mediante el control de los problemas de salinidad. Asimismo, se realizó una investigación a campo abierto en el laboratorio de Fisiología Vegetal con tres variedades de rúcula (Sais, Bonanza y Florensa) que fueron importadas.

Se usaron cloruro de sodio y bicarbonato o una mezcla de estos dos elementos. Los diversos tipos de arúgulas mostraron alta calidad en el lote salinizado (14.5 dS.m⁻¹). Los altos rendimientos estuvieron dentro del rango de 12 000 a 20 000 Kg.ha⁻¹. Los primeros 20 cm del terreno fueron clasificados como salinos debido a que tuvieron una CEE de 14.5 dS.m⁻¹ y un pH ligeramente alcalino de 7.5.

Dos Santos et al. (2020), con base en estudios sobre rendimiento de la arúgula, sostienen que el uso de sombreado junto con la salinidad del agua de riego hasta 1.4 dS m⁻¹ no afecta el área foliar de las plantas de arúgula, por lo que es posible cultivar sin pérdidas considerables cuando se refiere a la CEE del agua de irrigación.

En esta investigación se halló que el tratamiento control que contiene los componentes de Fe, Mg y Mn obtuvo el mayor promedio de 1.6 dS m, valor que se encontró dentro del rango hallados por los investigadores antes mencionados. Se corre el riesgo del quemado químico de las hojas cuando se rebase el valor de 2 dS m.

Tamaño de hojas

En los resultados se evidenció que el tamaño de hojas de la arúgulas en el tratamiento control alcanzó en promedio los 25.5 cm de altura, tal como se encontró en los hallazgos de las siguientes investigaciones:

Del Pino (2012) indica que estas plantas pueden tener una altura igual o mayor a 25 cm. Da Silva et al. (2019) encuentran que la producción de arúgula en Brasil, mediante el uso semillas producidas en el sistema convencional, obtienen mayores valores en cuanto a altura de planta tanto en verano como en otoño en los cultivares Ágatha (con 30.3 cm y 30.4 cm), Astro (29.4 cm y 31.3 cm) y Giovana (30 cm y 31.1 cm).

Los resultados también mostraron que el tratamiento control que contiene los componentes de Fe, Mg y Mn obtuvieron el mejor promedio de 25.5 cm, lo cual se encuentra dentro de los parámetros de los hallazgos anteriores. Los resultados también mostraron que, con deficiencias de manganeso, el tamaño de las hojas en promedio alcanzó un crecimiento de 12.67 cm, siendo de menor crecimiento dentro de los tratamientos.

Peso fresco de la planta (PFP)

Los resultados también mostraron que el tratamiento control, que contiene los componentes de Fe, Mg y Mn obtuvo el mejor promedio en cuanto a PFP,

que fue de 93.67 g. Los hallazgos de Jesus et al. (2015) en cultivos de rúculas hidropónicas bajo estrés salino encontraron que el aumento en la salinidad redujo el peso seco, siendo los valores medios para cultivos de hoja larga de 39.73 g y de hoja cultivada de 36.28 g; se observa que la primera es superior, lo que coincide con una mayor producción de biomasa seca en hojas y muestra la efectividad del sistema de defensa antioxidante al mantener el crecimiento del genotipo frente al aumento de salinidad en la solución de cultivo.

Schmidt et al. (2017) evaluaron el impacto de los diversos colores del perfil de cultivo en NLT con respecto al microclima, crecimiento y producción de cuatro cultivares de rúcula, en dos temporadas, y obtuvieron el mayor promedio en PFP con la técnica del Cultivado, que fue de 2394.01 g/m².

En su estudio sobre las relaciones de NO₃⁻ y NH₄⁺ en cultivos de lechugas, Lara et al. (2019) obtuvieron en promedio un PFP de 268.87 g en una relación 80/20; un PFP de 255.38 g en una relación 65/35; y un PFP de 240.44 g en una relación 50/50. La mezcla de NO₃⁻ y NH₄⁺ fue la adecuada, y las estaciones de verano y otoño no afectaron el crecimiento de las lechugas ni existieron diferencias significativas en ambas estaciones.

Para el PFP del cultivo Gionava, Cordeiro et al. (2019) obtuvieron el mejor desempeño de cultivos de rúcula con un sistema orgánico tanto en otoño, con un valor medio de 34.6 g, como en verano, con un valor promedio de 44 g. Guardabaxo et al. (2020) encontraron mejores desarrollos en el cultivo de rúculas con el uso de concentraciones de sal entre 67 y 100 %. De esta forma se obtuvo para la PFP, 617.9 g y 655.8 g respectivamente y no difirieron entre los diferentes tratamientos.

Peso seco de la planta (PSP)

Los resultados también mostraron que el tratamiento control, que contiene los componentes de Fe, Mg y Mn, obtuvo el mejor promedio en cuanto al PSP, que fue de 8.44 g. En los hallazgos de Jesus et al. (2015) sobre cultivos de rúculas hidropónicas bajo estrés salino, se observó que el aumento en la salinidad redujo el peso fresco, donde los valores medios para cultivos de Hoja Larga fueron de 14.33 g, y de Cultivada, 11.12 g. Así, la primera tuvo un resultado mayor, el cual coincidió con una mayor producción de biomasa fresca de plantas en hojas, lo que demuestra la efectividad del sistema de defensa antioxidante que mantiene el crecimiento del genotipo frente al aumento de salinidad en la solución de cultivo.

En su estudio sobre las relaciones de NO₃⁻ y NH₄⁺ en cultivos de lechugas, Lara et al. (2019) obtuvieron en promedio un PSP de 20.34 g en la una relación 80/20; un promedio de PSP de 18.42 g en la relación 65/35; y un promedio de 17.40 g en la relación 50/50. La mezcla de NO₃⁻ y NH₄⁺ fue la adecuada, y las estaciones de verano y otoño no afectaron el crecimiento de las lechugas ni existieron diferencias significativas en ambas estaciones. Da Silva et al. (2019) estudiaron cultivos de arúgulas producidos en un sistema orgánico protegido tanto en verano como en otoño. Se encontró que los rendimientos promedios del peso seco son mayores en el verano con los cultivares Ágatha (2.5 g) y Giovana (2.53 g) mientras que, en otoño, Giovana obtuvo el mayor promedio con 2.22 g y Cultivada, 2.19 g.

Riaño et al. (2019) hicieron modificaciones en los nutrientes de una solución hidropónica usada para espinacas baby, en este caso, la solución "La Molina", y obtuvieron en una de sus réplicas el mayor promedio de 1.69 g. Guardabaxo et al. (2020) encontraron que concentraciones de sales por encima del 67 %, cuyo peso medio fue 32.32 g, no produjeron incrementos significativos en el PSP.

CONCLUSIONES

El cultivo de plantas de arúgulas por medio del sistema de hidroponía es un cultivo en agua sin hacer uso del suelo, libre de plaguicidas y que genera mayor productividad. La arúgula, por sus propiedades, es una planta beneficiosa para la buena salud de las personas, pues este vegetal está relacionado con una menor incidencia de enfermedades crónicas (incluyen diferentes tipos de cáncer) gracias a sus glucosinolatos, que contienen azufre, y, en particular, a sus productos de degradación bioactivos (incluidos los isotiocianatos).

Los resultados de esta investigación tienen como propósito incentivar proyectos de inversión en el sector agroindustrial, específicamente en las fases de cultivo y procesamiento, sea como un producto fresco, seco y encapsulado. En consecuencia, es necesario dar a conocer los beneficios de la arúgula a la sociedad e incentivar su consumo.

Otra importancia de esta investigación es poner a disposición los cuidados necesarios para el cultivo de esta planta en el sistema hidropónico y así determinar qué elementos influyen en mantener las propiedades beneficiosas de la arúgula para el ser humano. Para evitar la clorosis es determinante la presencia del hierro, seguido por el magnesio y el

manganeso para mantener las cualidades organolépticas propias de la arúgula.

En el proceso del experimento se presentaron factores intervinientes: 1) Fue necesario hacer una reducción de la dosis de macronutrientes de 5ml a 3ml/L de agua. En el caso de los micronutrientes Fe, Mg y Mn, se mantuvo la dosis de 2 ml/L de agua; 2) Se controló la CEE dentro del rango de 1-2 dS m a fin de eludir la clorosis por quemado químico; 3) El tiempo de duración en el post-almácigo se redujo de 15 a 6 días para evitar la clorosis por deficiente oxigenación en las raíces; 4) En el proceso experimental se observó que las raíces de las 24 unidades experimentales requerían de una oxigenación correcta, por lo cual fue necesario una oxigenación artificial mediante el uso de los motores de pecera.

Finalmente, en el experimento se observó que las raíces de la arúgula tenían forma de U.

AGRADECIMIENTO

A los trabajadores del huerto hidropónico de la UNALM, quienes coadyuvaron con esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Ahmadi, M., y Sourì, M. K. (2018). Growth and mineral content of coriander (*Coriandrum sativum* L.) plants under mild salinity with different salts. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(11), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2773-x>
- [2] Aslani, M., y Sourì, M. K. (2018). Growth and Quality of Green Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under Foliar Application of Organic-Chelate Fertilizers. *Open Agriculture*, 3(1), 146-154. <https://doi.org/10.1515/opag-2018-0015>
- [3] Beltrano, J., y Giménez, D. (2015). Cultivo en hidroponía. Buenos Aires, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/book/414>
- [4] Carassay, L., Ponce, J., Siliquini, O., Bartel, A., Kin, A., Minig, M., Moyano, J., Ahumada, G., Baudino, E., y Taleisnik, E. (2018). Efecto de la salinidad en el cultivo de (*Eruca sativa*) "rúcula" cultivada en invernadero en la provincia de La Pampa. *Semiárida*, 25(2), 53-54. https://redib.org/Record/oai_articulo2793917-efecto-de-la-salinidad-en-el-cultivo-de-eruca-sativa-rucula-cultivada-en-invernadero-en-la-provincia-de-la-pampa
- [5] Caso, C., Chang, M., y Rodríguez-Delfin, A. (2010). Efecto del sustrato sobre la producción de fresa en sistema de columna. *Red Hidroponía*, Boletín Núm. 46, 7-12. <https://docplayer.es/20945068-Red-hidroponia-boletin-no-46-2010-lima-peru.html>
- [6] Cordeiro, C. J. X., Neto, J. de S. L., de Oliveira, M. K. T., Alves, F. A. T., Miranda, F. A. da C., y de Oliveira, F. de A. (2019). Cultivo de rúcula em fibra de coco utilizando solução nutritiva salinizada enriquecida com nitrato de potássio. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 13(1), 3212-3225. <https://doi.org/10.7127/rbai.v13n100960>
- [7] Da Silva, A., da Silva, D., Soares, T., Silva, Ê., dos Santos, A., y Rolim, M. (2011). Produção de rúcula em sistema hidropônico NFT utilizando água salina do Semiárido - PE e rejeito de dessalinizador. *Agrária*, 6(1), 147-155. <https://doi.org/10.5039/agraria.v6i1a929>
- [8] Da Silva, P. A., Kinjo, S., de Melo, M. P. B. X., y Sala, F. C. (2019). Evaluation of arugula cultivars and seed production in the organic system. *Journal of Seed Science*, 41(4), 423-430. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v41n4218457>
- [9] Del Pino, M. (2012). El cultivo de rúcula. *Contacto Rural*(1), 10-11. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/62543>
- [10] Flores, M., Martínez, M., Rodríguez, J., Colinas, M., y Nieto, D. (2014). Jugo de brócoli en la inhibición de alternaria alternata en arúgula mínimamente procesada: calidad postcosecha. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 20(3), 307-322. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.09.028>
- [11] Gruda, N. (2019). Increasing Sustainability of Growing Media Constituents and Stand-Alone Substrates in Soilless Culture Systems. *Agronomy*, 9(6), 298. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
- [12] Guardabaxo, C., Assis, K., Figueiredo, F., y Silva, L. (2020). Cultivo da rúcula em sistema hidropônico sob diferentes concentrações de sais. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, 14(3), 274-282. <https://doi.org/10.18011/bioeng2020v14n3p274-282>
- [13] Jesus, C., Silva, F., Camara, T., Silva, Ê., y Willadino, L. (2015). Production of rocket under salt stress in hydroponic systems. *Horticultura Brasileira*, 33(4), 493-497. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620150000400014>

- [14] Jordan, R., Ribeiro, E., Oliveira, F., Geisenhoff, L., y Martins, E. (2018). Yield of lettuce grown in hydroponic and aquaponic systems using different substrates. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(8), 525-529. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n8p525-529>
- [15] Lara, A., Rojas, A., Romero, M., Ramírez, H., Cruz, E., Alcalá, J., y Loredó, C. (2019). Crecimiento y acumulación de NO₃⁻ en lechuga hidropónica con relaciones nitrato/amonio en dos estaciones de cultivo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(1), 21-29. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802019000100021&script=sci_abstract
- [16] Marchioni, I., Martinelli, M., Ascrizzi, R., Gabrielli, C., Flamini, G., Pistelli, L., y Pistelli, L. (2021). Small Functional Foods: Comparative Phytochemical and Nutritional Analyses of Five Microgreens of the Brassicaceae Family. *Foods*, 10(2), 427. <https://doi.org/10.3390/foods10020427>
- [17] Riaño, E., Caicedo, L., Torres, A., y Hurtado, H. (2019). Cambios en los niveles de nutrientes en solución hidropónica de espinaca baby (*Spinacia oleracea* L.), para su futura aplicación en acuaponía. *Orinoquia*, 23(1), 73-84. <https://doi.org/10.22579/20112629.544>
- [18] Riaz, N., y Guerinot, M. I. (2021). All together now: regulation of the iron deficiency response. *Journal of Experimental Botany*, 72(6), 2045-2055. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab003>
- [19] Rodríguez, M., y Flórez, V. (2004). Elementos esenciales y beneficiosos. (Monografía). Universidad de Almería, Almería. <http://repositorio.ual.es/handle/10835/3133#.YhxO-lcjERc.mendeley>
- [20] Sánchez-del Castillo, F., Portillo-Márquez, L., Moreno-Pérez, E., Magdaleno-Villar, J., y Vázquez-Rodríguez, J. C. (2021). Effects of container volume and seedling density on late transplanting and number of flowers in tomato. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 27(2), 71-84. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.06.015>
- [21] Santos, C. S., Rodrigues, E., Ferreira, S., Moniz, T., Leite, A., Carvalho, S. MP., Vasconcelos, M. W., y Rangel, M. (2021). Foliar application of 3-hydroxy-4-pyridinone Fe-chelate [Fe(mpp)₃] induces responses at the root level amending iron deficiency chlorosis in soybean. *Physiologia Plantarum*, 173, 235-245. <https://doi.org/10.1111/ppl.13367>
- [22] Schmidt, D., Gabriel, V., Caron, B., Souza, V., Boscaini, R., Pinheiro, R., y Cocco, C. (2017). Hydroponic rocket salad growth and production according to different color profiles. *Horticultura Brasileira*, 35(1). <https://doi.org/10.1590/S0102-053620170117>
- [23] Silva, A., Anderson, F., Nowaki, R., Cecilio, A., y Mendoza-Cortez, J. (2017). Síntomas de deficiencia de macronutrientes en pimiento (*Capsicum annum* L.). *Agrociencia Uruguay*, 21(2), 31-43. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482017000200031&lng=en&tlng=en
- [24] Dos Santos, R., dos Santos, M., da Silva, F., Santos, J., dos Santos, S., Reis, L., y Tavares, C. (2020). Desempenho da rúcula sob condições de sombreamento e níveis de salinidade da água de irrigação. *Colloquium Agrariae*, 16(4), 38-45. <https://doi.org/10.5747/ca.2020.v16.n4.a381>
- [25] Sturm, C., y Wagner, A. (2017). Brassica-Derived Plant Bioactives as Modulators of Chemopreventive and Inflammatory Signaling Pathways. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(9), 1890. <https://doi.org/10.3390/ijms18091890>