

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

CRECIMIENTO Y CONSUMO DE NUTRIENTES DE LECHUGA Y

RÚCULA EN SISTEMA HIDROPÓNICO NFT

por

Juan Ignacio AYRES LAPORTA

**Trabajo final de grado presentado
como uno de los requisitos para obtener
el título de Ingeniero Agrónomo**

MONTEVIDEO

URUGUAY

2023

Trabajo final de grado aprobado por:

Directora: -----

Cecilia Berrueta

Rafael Grasso

Guillermo Galván

Gustavo Giménez

Fecha: 8 de febrero de 2023

Autor: -----

Juan Ignacio Ayres Laporta

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco en primer lugar a mi familia por el gran apoyo y soporte fundamental durante este trabajo y en toda la carrera.

A mis tutores, por permitirme realizar este trabajo con ustedes y estar presentes en todo momento.

Al personal de la biblioteca de la Facultad de Agronomía por facilitarme material para la revisión bibliográfica.

A todo el personal de la empresa VerdeAgua por abrirme las puertas y brindarme una gran oportunidad para mi formación profesional.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. PRODUCCIÓN DE CULTIVOS DE HOJA EN URUGUAY	4
2.2. CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE CULTIVOS DE LECHUGA Y RÚCULA	7
2.2.1. <i>Cultivo de lechuga</i>	7
2.2.2. <i>Cultivo de rúcula</i>	9
2.3. CULTIVOS HIDROPÓNICOS	10
2.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA HIDROPONIA	13
2.5. FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS EN HIDROPONÍA.....	16
2.5.1. <i>Temperatura ambiente</i>	16
2.5.2. <i>Radiación solar</i>	16
2.5.3. <i>Humedad relativa</i>	17
2.6. SOLUCIÓN NUTRITIVA.....	18
2.6.1. <i>Calidad del agua en hidroponia</i>	22
2.6.2. <i>Fertilizantes</i>	23
2.6.3. <i>Fórmulas de solución nutritiva</i>	24
2.6.4. <i>Salinidad de la solución</i>	25
2.6.5. <i>pH</i>	26
2.6.6. <i>Temperatura de la solución</i>	27
3. MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES DONDE SE REALIZÓ EL EXPERIMENTO.....	30

3.2.	CULTIVOS DE LECHUGA Y RÚCULA EVALUADOS.....	33
3.3.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA HIDROPÓNICO UTILIZADO	34
3.4.	SOLUCIÓN NUTRITIVA.....	35
	3.4.1. <i>Combinación de fertilizantes</i>	36
	3.4.2. <i>Forma de preparación</i>	39
3.5.	MEDICIONES REALIZADAS	40
	3.5.1. <i>Conductividad, pH y temperatura de la solución nutritiva</i>	40
	3.5.2. <i>Análisis de la concentración de cationes y aniones en solución</i>	41
	3.5.3. <i>Acumulación de peso fresco, materia seca y consumo de potasio y nitrógeno</i>	41
	3.5.4. <i>Temperatura del aire y humedad relativa</i>	42
	3.5.5. <i>Radiación en el interior de los invernaderos</i>	42
4.	RESULTADOS.....	43
4.1.	EVALUACIÓN DE CONDICIONES AMBIENTALES	43
	4.1.1. <i>Radiación solar incidente</i>	43
	4.1.2. <i>Temperatura ambiente y humedad relativa</i>	45
4.2.	MANEJO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA	46
	4.2.1. <i>Cultivo de lechuga</i>	47
	4.2.2. <i>Cultivo de rúcula</i>	48
4.3.	EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE NUTRIENTES	50
	4.3.1. <i>Concentración de nutrientes en la solución nutritiva</i>	50
	4.3.2. <i>Consumo de nutrientes por el cultivo de lechuga</i>	52
	4.3.3. <i>Cultivo de rúcula</i>	56
4.4.	EVALUACIÓN DE CRECIMIENTO	60
	4.4.1. <i>Cultivo de lechuga</i>	60
	4.4.2. <i>Cultivo de rúcula</i>	62
4.5.	ANÁLISIS FOLIAR	64
	4.5.1. <i>Análisis de la absorción de nutrientes</i>	65
5.	DISCUSIÓN	67

5.1.	CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL CRECIMIENTO	67
5.2.	MANEJO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA	68
	5.2.1. <i>pH, temperatura y conductividad eléctrica</i>	68
	5.2.2. <i>Concentración de nutrientes</i>	69
5.3.	ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA Y RENDIMIENTO	72
	5.3.1. <i>Cultivo de lechuga</i>	72
	5.3.2. <i>Cultivo de rúcula</i>	73
5.4.	ANÁLISIS DE ABSORCIÓN DE NUTRIENTES.....	74
	5.4.1. <i>Cultivo de lechuga</i>	74
	5.4.2. <i>Cultivo de rúcula</i>	75
6. CONCLUSIONES E IMPLICANCIAS PRÁCTICAS DEL DIAGNÓSTICO REALIZADO		77
7. RESUMEN.....		79
8. SUMMARY		80
9. BIBLIOGRAFÍA.....		81
10. ANEXOS		99
	<i>Anexo 1. Evaluación de crecimiento de lechuga</i>	99
	<i>Anexo 2. Evaluación de crecimiento de rúcula</i>	100
	<i>Anexo 3. Radiación solar en el primer ciclo de cultivo</i>	101
	<i>Anexo 4. Radiación solar en el segundo ciclo de cultivo</i>	102
	<i>Anexo 5. Temperatura y % de humedad relativa del primer ciclo</i>	103
	<i>Anexo 6. Temperatura y % de humedad relativa del segundo ciclo</i>	104

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Número de productores, superficie, producción y rendimiento (total y por cultivo) de cultivos protegidos en el Sur del país.	6
2. Sales fertilizantes usadas en Hidroponia.	23
3. Concentraciones de nutrientes en soluciones nutritivas para lechuga de diferentes autores.	24
4. Solubilidad del oxígeno de acuerdo con la temperatura.	28
5. Duración de los ciclos de cultivo de lechuga y rúcula.	34
6. Fertilizantes utilizados con su grado de pureza y solubilidad.	36
7. Formulaciones utilizadas para la solución nutritiva concentrada a 3,9 mS cm ⁻¹	37
8. Concentración de nutrientes en la solución concentrada y diluida aportados por las dos recetas usadas en los dos ciclos de cultivo (considerando los iones aportados por el agua de riego utilizada).	38
9. Análisis de agua de red (OSE).	39
10. Temperatura ambiente y humedad relativa medida dentro de los invernaderos para ambos ciclos.	45
11. Temperatura, pH y conductividad de la solución promedio para ambos ciclos de cultivo en lechuga y rúcula.	46
12. Concentraciones de potasio y nitrato en la solución nutritiva del primer ciclo (otoño) de lechuga y rúcula.	51
13. Concentraciones de potasio, nitrato, calcio y sodio en solución nutritiva del segundo ciclo (verano) de lechuga y rúcula.	51
14. Concentración de K ⁺ (mmol L ⁻¹) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de lechuga según ciclo.	52
15. Concentración de NO ₃ ⁻ (mmol L ⁻¹) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de lechuga según ciclo.	53
16. Concentración de Ca ₂ ⁺ (mmol L ⁻¹) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de lechuga.	54
17. Concentración de Na ⁺ (mmol L ⁻¹) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de lechuga.	55
18. Concentración de K ⁺ (mmol L ⁻¹) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de rúcula según ciclo.	56
19. Concentración de NO ₃ ⁻ (mmol L ⁻¹) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de rúcula según ciclo.	57

20. Concentración de Ca_2^+ (mmol L^{-1}) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de rúcula.	58
21. Concentración de Na^+ (mmol L^{-1}) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de rúcula.	59
22. Tasa de crecimiento semanal en peso fresco y seco del cultivo de lechuga.	61
23. Tasa de crecimiento semanal en peso fresco y seco del cultivo de rúcula según ciclo.	63
24. Concentración semanal de nitrógeno y potasio en hojas de lechuga según ciclo.	64
25. Concentración semanal de nitrógeno y potasio en hojas de rúcula según ciclo...64	

Figura No.

Página

1. Gráfica de los principales cultivos establecidos en sistemas hidropónicos en Norteamérica (izquierda) y Sudamérica (derecha) en base a superficie.	1
2. Promedio de ingresos y precios de lechuga en el Mercado Modelo (2017-2019) e ingresos y precios 2020.	4
3. Evolución del peso fresco de la parte aérea de lechuga cultivar Dolly.....	9
4. Modelo de sistema NFT.	13
5. Esquema del crecimiento o rendimiento de la planta en función de la presencia de un elemento esencial.	21
6. Contenido medio de oxígeno disuelto en la solución nutritiva en función de las horas del día en un sistema de cultivo NFT.	28
7. (A) Vista exterior del Invernadero F1 y (B) del Invernadero K2.	31
8. (A) Vista interior del Invernadero F1 y (B) del Invernadero K2.	32
9. Izquierda: sector de lechuga recién trasplantado. Derecha: sector de rúcula recién trasplantado.	35
10. Radiación solar diaria acumulada incidente en el exterior y el interior de los invernaderos en los cultivos del ciclo 1 (A) y del ciclo 2 (B).	44
11. (A) Temperatura media diaria en la solución nutritiva de lechuga según ciclo. (B) pH diario de la solución nutritiva de lechuga según ciclo.	47
12. Conductividad eléctrica promedio diaria (mS cm^{-1}) de la solución nutritiva a la entrada y a la salida del sistema en lechuga según ciclo.....	48
13. (A) Temperatura promedio diaria de la solución nutritiva de la rúcula según ciclo. (B) pH diario de la solución nutritiva de rúcula según ciclo.....	49

14. Conductividad eléctrica promedio diaria (mS cm^{-1}) de la solución nutritiva a la entrada y a la salida del sistema en rúcula según ciclo.	50
15. Fases de crecimiento y desarrollo del cultivo de lechuga (DDT: Días después de trasplante).....	60
16. Peso seco promedio por planta del cultivo de lechuga.	61
17. Fases de crecimiento y desarrollo del cultivo de rúcula en el ciclo 1 y en el ciclo 2 (DDT: Días después de trasplante).	62
18. Peso seco promedio por planta del cultivo de rúcula.....	63
19. Absorción de nutrientes durante el ciclo 1 y 2 del cultivo de lechuga.....	65
20. Absorción de nutrientes a lo largo del ciclo 1 y del ciclo 2 del cultivo de rúcula.	66

1. INTRODUCCIÓN

Los cultivos hidropónicos han llegado a ser una realidad para los cultivadores en invernaderos en diversas áreas climáticas, existiendo grandes instalaciones hidropónicas a través del mundo tanto para el cultivo de flores como de hortalizas (Resh, 2001). El área total estimada en el mundo para la producción de vegetales en invernadero es de 496.800 ha de las cuales 95.000 ha corresponden a sistemas de cultivo sin suelo / hidropónicos (Hickman, citado por Shi, 2019).

El sistema de producción hidropónico se ha consolidado como una tecnología de reconocida eficiencia y de masiva implementación en países desarrollados y altamente tecnificados, como Holanda, España, EE UU, Israel y Japón (Puerta, 2020). A nivel mundial se estima que los cultivos hidropónicos han presentado un crecimiento anual de 4.5 % de 2011 a 2016 (IBISWorld, 2022). En Norteamérica, el tomate representa el 56 % de la superficie hidropónica, mientras que en Sudamérica el principal cultivo corresponde a la lechuga con el 49 % de la superficie de cultivos hidropónicos (Intagri, 2017b) (Figura 1). Ente los cultivos de hoja, la rúcula se ha expandido en superficie debido al aumento de la demanda del mercado y es la segunda más cultivada bajo sistema hidropónico luego de la lechuga (Matos et al., 2016).

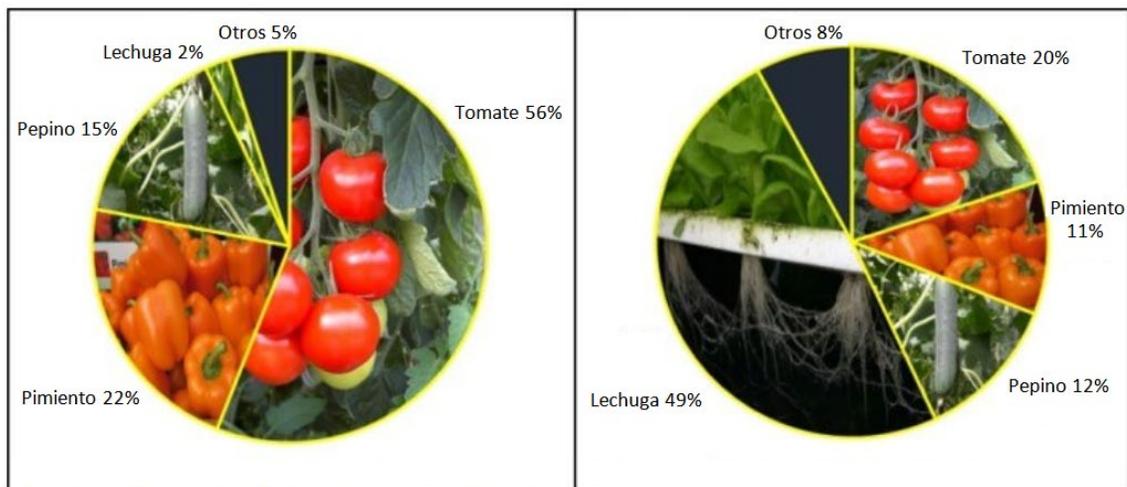


Figura 1. Gráfica de los principales cultivos establecidos en sistemas hidropónicos en Norteamérica (izquierda) y Sudamérica (derecha) en base a superficie.

Fuente: Intagri (2017b).

En Uruguay, la producción hidropónica ha despertado interés en los últimos años. Existen emprendimientos comerciales que cultivan bajo sistema hidropónico tomate, morrón, frutilla, cultivos de hoja y en forma más reciente el cultivo comercial de cannabis. No hay estadísticas oficiales acerca de la evolución de la hidroponía en Uruguay.

Los cultivos sin suelo pueden definirse como métodos para cultivar plantas mediante el suministro de una solución nutritiva sin el uso del suelo como medio de enraizamiento (Savvas et al., 2013). Los cultivos en sustrato como fibra de coco y perlita son los más utilizados en el mundo para cultivo de hortalizas de fruto. Sistemas de cultivo en agua como la hidroponía flotante o el NFT (*Nutrient Film Technique*, técnica de la película nutriente) se utilizan principalmente para cultivo de hortalizas de hoja como la lechuga (Savvas y Gruda, 2018).

En sistemas hidropónicos cerrados, Resh (2001) refiere que la absorción relativa de los diversos elementos minerales por la planta está afectada principalmente por las condiciones ambientales (temperatura, humedad e intensidad lumínica), por la naturaleza del cultivo y por el estado de desarrollo de la planta. La búsqueda de optimizar los rendimientos ha llevado a científicos a ajustar la composición de la solución nutritiva a las necesidades de las distintas especies de plantas cultivadas y se han diseñado recetas estandarizadas para diferentes cultivos (Sonneveld y Voogt, 2009). La composición de la solución nutritiva debe adaptarse a las características del agua utilizada para su preparación, a las especies a cultivar y al clima local (Savvas y Gruda, 2018). Teóricamente, la composición de una solución nutritiva para una especie de cultivo en particular y una etapa de desarrollo es óptima cuando las proporciones medias de absorción entre los nutrientes individuales son similares con las proporciones relativas entre los mismos nutrientes en la solución suministrada. Este principio debe seguirse estrictamente en condiciones cerradas (Sonneveld y Voogt, 2009).

A medida que las plantas crecen y se desarrollan, absorben los distintos nutrientes a diferentes velocidades, lo que lleva a la acumulación de iones menos deseables en la solución nutritiva. La acumulación de iones menos consumidos en la solución de nutrientes puede conducir a un aumento en la electroconductividad, con cantidades insuficientes de los nutrientes más utilizados, lo que resulta en deficiencias y antagonismos entre nutrientes, entre iones con propiedades fisicoquímicas similares, así como en síntomas de toxicidad de nutrientes (Cloutier et al., 1997). En estos casos, la solución de nutrientes deberá ser ajustada antes de que aparezca algún efecto sobre el crecimiento del cultivo y síntomas en los tejidos de la planta.

Estos ajustes nos evitarán que exista algún desarreglo mineral en la planta y de esta forma incrementaremos las cosechas, por medio de proporcionar a los vegetales un desarrollo bajo las condiciones óptimas de nutrición mineral (Resh, 2001). Los productores deberán experimentar en sus propios sistemas, teniendo en cuenta la calidad del agua disponible (Van Os et al., 2016), observando, testeando y ajustando hasta alcanzar el balance adecuado entre composición y uso para su situación particular y las especies de plantas producidas. No obstante, resulta sorprendente que en muchos casos las plantas parecen ser capaces de adaptarse, creciendo razonablemente bien, pero sin alcanzar su potencial genético. La producción de plantas alcanzando el potencial genético requiere un preciso manejo del entorno de elementos nutricionales en el medio radicular (Benton Jones, 2014).

El desafío planteado es, a través de la información y el conocimiento, poder satisfacer las demandas nutricionales de las variedades producidas a partir de una solución adecuada a las condiciones ambientales locales, buscando optimizar los rendimientos y la calidad de los cultivos. La estabilidad de la solución permitirá prolongar los tiempos de renovación preservando agua y nutrientes y favoreciendo el cuidado del ambiente.

Este trabajo de tesis tuvo como objetivo analizar un sistema de producción hidropónico NFT comercial de lechuga y rúcula, haciendo énfasis en la evaluación del crecimiento, del rendimiento y en la cuantificación del consumo de nitrógeno, potasio, calcio y sodio de la lechuga y rúcula, con un manejo de cultivo y de solución nutritiva particular de una situación real de producción. Este trabajo aporta datos nacionales de producción, manejo y consumo de nutrientes de lechuga y rúcula hidropónica obtenidos de una situación real de producción en la zona sur de Uruguay.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. PRODUCCIÓN DE CULTIVOS DE HOJA EN URUGUAY

La expresión “cultivos de hoja”, es un término amplio utilizado para un grupo de cultivos vegetales (hortalizas) con hojas comestibles. El órgano de consumo son las hojas. Las plantas en este grupo pertenecen a varias familias de diferentes grupos taxonómicos que incluyen Brassicaceae, Chenopodiaceae y Asteraceae (Kaiser y Ernst, 2017), entre otras. Con respecto a la producción de cultivos de hoja en Uruguay, el anuario MGAP. OPYPA (2014) refiere que, de acuerdo a datos del Censo 2011, existen 972 explotaciones con 1710 ha cultivadas, constatándose una disminución cercana a 63% en el número de explotaciones y de 56% en las hectáreas cultivadas con respecto al Censo del año 2000.

Según el Observatorio Granjero (2017), el consumo de lechuga en Uruguay es de 3,0 kg/persona/año. La lechuga es producida a lo largo de todo el año, a pesar de lo cual presenta una gran variación en su oferta a través de las diferentes estaciones (la más baja en invierno) (Figura 2).

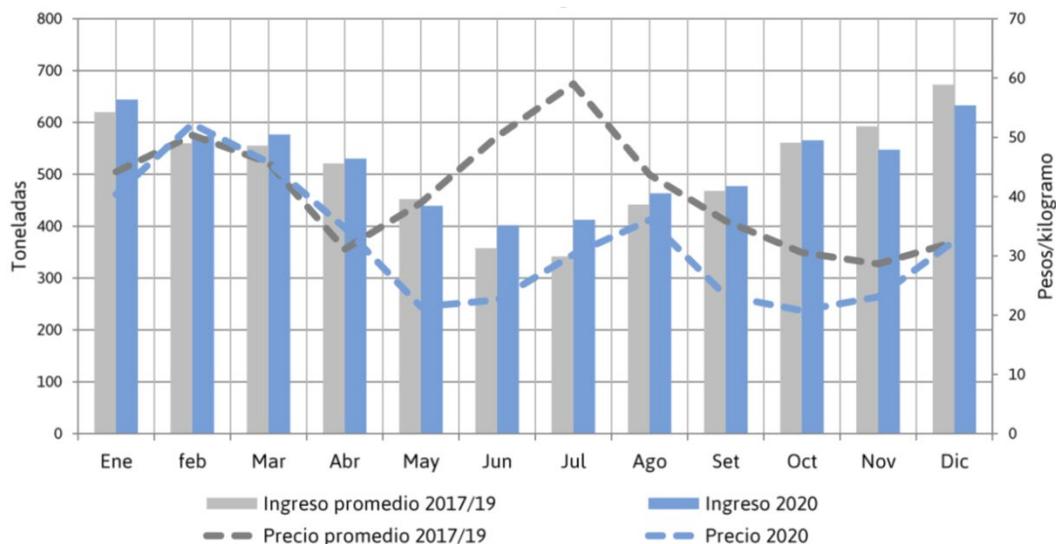


Figura 2. Promedio de ingresos y precios de lechuga en el Mercado Modelo (2017-2019) e ingresos y precios 2020.

Fuente: Mercado Modelo (2020).

De acuerdo al Mercado Modelo (2020), la lechuga representó el 2% (6265 toneladas) del total de ingresos de frutas y hortalizas al Mercado Modelo durante el año 2020. El monto comercializado fue de 4.683.916 dólares americanos que corresponden al 2% del monto bruto total comercializado de hortalizas frescas en el Mercado Modelo en ese año.

Las zonas de producción más importantes están ubicadas en Montevideo Rural (Cuchilla Grande y Toledo al este, Rincón del Cerro y Paso de la Arena al oeste) y secundariamente en Canelones. En los alrededores de las capitales departamentales y otras ciudades importantes del interior existen pequeñas zonas de producción que compiten exitosamente en el abastecimiento de cada localidad en base a la cercanía y la perecibilidad de este tipo de hortalizas. Estos productos presentan gran sensibilidad a fenómenos meteorológicos extremos, especialmente a tormentas de viento y/o granizo y en menor medida a daños causados por heladas cuando está cerca del momento de cosecha. También son afectados por plagas y enfermedades, por desórdenes nutricionales y fenómenos de salinidad, aun en cultivos a campo. Por el efecto negativo de fenómenos meteorológicos extremos en cultivos a campo, el cultivo protegido de lechuga (realizado en invernáculos, macrotúneles o microtúneles) ha tenido un gran desarrollo en los últimos años (Observatorio Granjero, 2017).

Según la encuesta hortícola (2015/16), hay 157 productores de lechuga protegida en el sur del país (Cuadro 1). El rendimiento de lechuga en los cultivos protegidos es de 18 t ha⁻¹ mientras que los cultivos de lechuga a campo en Uruguay alcanzan rendimientos de 13 t ha⁻¹ según la Encuesta Hortícola Sur 2015/2016 del MGAP. DIEA (2017). No hay registros de los rendimientos de lechuga hidropónica en Uruguay. Algunas referencias internacionales indican para lechuga Salanova bajo cultivo hidropónico un rendimiento de 23,3 t ha⁻¹ (Valverde, 2013) y 23,5 t ha⁻¹ (Singh y Singh, 2012).

Cuadro 1. Número de productores, superficie, producción y rendimiento (total y por cultivo) de cultivos protegidos en el Sur del país.

Cultivo	Productores⁽¹⁾ (n.º)	Superficie (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (kg/m ²)
Total	488	355	14.810	---
Tomate de mesa	383	87	8.537	9,8
Lechuga	157	212	3.769	1,8
Morrón	151	28	2.504	9,0
Otros cultivos		0	0	

Fuente: MGAP. DIEA (2017).

En el Mercado local se distinguen diferentes tipos comerciales de lechuga:

- Mantecosas, que forman cabeza o sin cabeza.
- Crespas
- Romanas
- Moradas
- Hojas de roble
- Iceberg

En los últimos años se han incorporado nuevos tipos de lechuga en el consumo de los uruguayos. Esta innovación ha sido favorecida por la difusión de la cocina gourmet, como una opción de diversificación del consumo de vegetales, agregando nuevos sabores, texturas y colores (Observatorio Granjero, 2014).

Una tendencia fuerte en el consumo de lechuga a nivel mundial es hacia las preparaciones IV Gama. La IV Gama son vegetales, frutas y hortalizas frescas, lavadas y envasadas listas para su consumo, con el requisito de que no hayan sido sometidas a

ningún tratamiento térmico que altere sus propiedades nutricionales iniciales (Observatorio Granjero, 2014). En el caso de lechuga, las presentaciones IV Gama son envases con hojas cortadas o enteras, o mezcla de hojas de diferentes tipos y formas, solas o acompañadas con otras especies como por ejemplo hojas de rúcula (Observatorio Granjero, 2014). A nivel mundial este tipo de producto ha adquirido gran importancia, facilitando la compra y preparación a los consumidores que tienen poco tiempo, brindándoles un producto fresco y natural, con un aprovechamiento del 100% y de fácil preparación. En nuestro país, en el caso de lechuga es probable que su demanda muestre una tendencia en aumento en los próximos años (Observatorio Granjero, 2014).

2.2. CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE CULTIVOS DE LECHUGA Y RÚCULA

2.2.1. Cultivo de lechuga

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) pertenece a la familia Compositae, tribu Cichoriae. El centro de origen primario se ubica en el Medio-Oriente y área mediterránea (Galván y Rodríguez, 2008). Es una planta herbácea anual de tallo corto de 2 a 5 cm y consistencia carnosa, en la cual se insertan las hojas, capaces de formar o no cabeza, teniendo forma, número, dimensiones y colores variables, según variedad botánica y cultivar. El sistema radicular es denso y superficial. Normalmente es pivotante alcanzando una profundidad máxima de 60 cm, con numerosas raíces laterales en los primeros 30cm. Si el cultivo se lleva adelante mediante la modalidad de almácigo/trasplante se rompe la dominancia de la raíz principal, y hay fácil regeneración de raíces adventicias, resultando un sistema más ramificado y superficial (Galván y Rodríguez, 2008). En el caso de plantas bajo cultivo hidropónico, la raíz, al no tener que explorar y expandirse en búsqueda de humedad en el suelo, produce raíces típicas homorrizas que cubren un gran volumen para absorber nutrientes (Saavedra, 2017).

Los componentes contenidos en la lechuga, como compuestos fenólicos, ácido ascórbico, carotenoides, tocoferoles y glucosinatos, son beneficiosos para la salud humana y pueden ayudar a prevenir enfermedades humanas como cáncer, problemas cerebrovasculares y cardiovasculares (Chutichudet et al., 2011).

Según Saavedra (2017), dentro de la especie *Latuca sativa* L. se diferencian cinco variedades botánicas:

- *Latuca sativa* L. var. *longifolia*: son lechugas que se aprovechan por sus hojas y no forman verdaderos cogollos. Corresponden a las llamadas lechugas romanas caracterizadas por hojas grandes, alargadas, de nervaduras prominentes.
- *Latuca sativa* L. var. *capitata*: son variedades que forman cogollo apretado. Presentan hojas anchas, lisas, de textura mantecosa, las hojas internas forman un cogollo amarillento al envolver a las más nuevas.
- *Latuca sativa* L. var. *crispa* L.: se distinguen dos subtipos, las llamadas iceberg que forman cabeza compacta y las Batavia que forman una cabeza menos densa y son más pequeñas e irregulares.
- *Lactuca sativa* L. var. *Acephala* Dill: se caracterizan por tener hojas sueltas y dispersas. Corresponden a las llamadas Lollo Rosa, hoja de roble, etc. Son lechugas de corte o de hojas sueltas. No forman cogollo.
- *Latuca sativa* L. var. *Augustuana* All.: son las lechugas espárrago o de tallo cultivadas en China. Se utiliza principalmente el tallo carnoso y también las hojas que pueden presentar color verde o rojizo.

Según Galván et al. (2016), el crecimiento de la lechuga puede ser dividido en tres etapas:

- 1) Plántula: caracterizada por la aparición de la radícula, la emergencia de los cotiledones y el crecimiento radical en profundidad. El desarrollo hasta la aparición de 3 o 4 hojas verdaderas se extiende de 3 a 4 semanas. La germinación es fotoblástica positiva, con una temperatura óptima entre 18 y 25° y es inhibida por encima de 28-30° C.
- 2) Fase de roseta: se caracteriza por la aparición de nuevas hojas, con disminución de la relación largo-ancho de los folíolos y acortamiento de los pecíolos. La roseta se forma con 12 a 14 hojas.
- 3) Formación de la cabeza: las hojas se hacen más anchas que largas y se curvan por el eje de la nervadura central sobre el punto de crecimiento de la planta

(crecimiento erecto). De esta forma las nuevas hojas en el ápice quedan envueltas por las hojas externas formándose la cabeza. Esta etapa tiene 2-3 semanas de duración.

La tasa de crecimiento (aumento de materia seca total/día) es exponencial en todo el ciclo del cultivo (Figura 3). En los últimos 20 días puede ocurrir hasta un 60% del crecimiento total por lo tanto la máxima tasa de crecimiento se alcanza al final del ciclo comercial (Galván y Rodríguez, 2008).

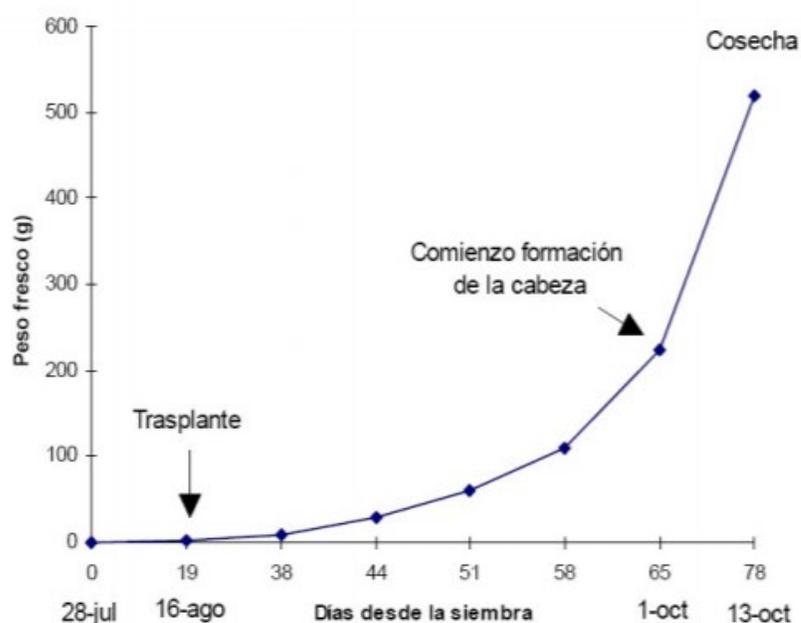


Figura 3. Evolución del peso fresco de la parte aérea de lechuga cultivar Dolly

Fuente: Ubilla y Gilsanz (1995).

2.2.2. Cultivo de rúcula

La rúcula (*Eruca sativa* Mill.) pertenece a la familia Brassicaceae. Es una planta anual, erecta, las hojas tienen hendiduras en los márgenes con puntas redondeadas, son levemente carnosas y poco pubescentes. La planta tiene de 5 a 7 hojas cuyo tamaño puede llegar a 25 cm de largo o más. Como el órgano de consumo es la hoja sin la

inflorescencia la floración del cultivo no es deseable. Se cultiva al aire libre o en invernaderos todo el año, aunque en la primavera, con días largos y altas temperaturas florece y esto perjudica la calidad (Del Pino, 2012).

El cultivo se realiza a partir de semilla. La germinación es rápida y sin problemas en cualquier época del año con temperaturas óptimas de 25-27 °C. El ciclo de cultivo es corto de 20 a 60 días. La cosecha se realiza con raíz o por cortes sobre la base del tallo, sobre hojas de 10 a 15 cm. El rendimiento es de 7500 a 28000 kg/ha que puede variar según época del año, número de cortes y tamaño de hoja a la cosecha (Del Pino, 2012).

El órgano de consumo lo constituyen las hojas y tallos jóvenes, que se ingieren crudos en ensaladas (Stephens, 2006). Contiene un amplio rango de fitoquímicos promotores de la salud, incluidos carotenoides, vitamina C, fibra, flavonoides y glucosinolatos (Podsędek, 2007). Los glucosinolatos y sus productos de degradación han demostrado ser unos potentes inhibidores del crecimiento de ciertas células tumorales. Se ha comprobado que ciertos compuestos como el sulforrafano, derivado de la glucorafanina, un glucosinolato presente en las hojas de rúcula tienen un marcado efecto protector contra determinadas sustancias carcinogénicas (Juge et al., 2007).

Por otra parte, un aspecto importante en la producción de vegetales de hoja es la reducción de su contenido de nitratos por los efectos indirectos negativos sobre la salud humana. El nitrato no es tóxico, pero sus metabolitos pueden ser carcinógenos. La rúcula es una especie incluida entre las que presentan alto contenido de nitratos ($>2500 \text{ mg kg}^{-1}$ de peso fresco) (Fontana y Nicola, 2009). El valor límite de nitrato foliar impuesto por la Unión Europea es de 4500 mg kg^{-1} de peso fresco (Falovo et al., 2009).

2.3. CULTIVOS HIDROPÓNICOS

El término hidroponía proviene de la combinación de dos palabras griegas *Hydro* que significa agua y *Ponos* que significa trabajo (agua que trabaja) (Benton Jones, 2014). Según Urrestarazú (2015), los cultivos sin suelo incluyen a todos aquellos métodos y sistemas que hacen crecer las plantas fuera de su ambiente natural: el suelo. La hidroponía es una forma de cultivo sin suelo. Gilsanz (2007) la define como una serie de sistemas de producción en donde los nutrientes llegan a la planta a través del agua, son aplicados en forma artificial y el suelo no participa en la nutrición.

Algunos sistemas de cultivo sin suelo son:

- **Aeroponía:** consiste en cultivos en contenedores en donde las raíces se encuentran en una atmósfera saturada de humedad y fertirrigadas continua o discontinuamente con una mezcla de agua y nutrientes en forma de pequeñas gotas o de aerosol (Urrestarazú, 2015).
- **Cultivos en sustratos:** el sustrato es un material sólido (natural o de síntesis) distinto del suelo que permite el desarrollo del sistema radical, el crecimiento del cultivo y puede intervenir o no en la nutrición de la planta. El sustrato brinda sostén y anclaje a la planta, además de mantener la humedad, drenaje, aireación y facilidad en la absorción de nutrientes para que la planta no tenga ningún problema en su desarrollo. Los sustratos que más comúnmente se utilizan en los sistemas de cultivo sin suelo son los siguientes: arena, perlita, lana de roca, turbas, fibra de coco y cáscara de arroz (Intagri, 2017a).
- **Sistema hidropónico de raíz flotante:** las plantas se instalan en estructuras flotantes sobre la solución nutritiva. El sistema flotante es el más sencillo de realizar, de bajo costo y no demanda el uso de energía extra. Consta de un recipiente en donde se coloca la solución nutritiva y sobre ella flotando la plancha de espuma que soporta las plantas. En este sistema es necesario realizar un cambio de solución semanalmente o al menos renovar parte de ella. Además, se requiere de la aireación del sistema por medio de agite de la solución diariamente. Las desventajas de este sistema consisten en la necesidad de reposición frecuente de la solución nutritiva, la necesidad de airear el medio y prever la contaminación del soporte de espuma por algas que encuentran su fuente de alimento en la solución nutritiva, incentivadas por el acceso a la luz (Gilsanz, 2007).
- **Sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique):** es una técnica de solución nutritiva recirculante en canales. El término Nutrients Film Technique fue utilizado para remarcar que la profundidad de flujo de líquido que pasaba a través de las raíces de las plantas debía ser muy pequeño (laminar) para que de esta forma pudieran disponer del oxígeno

necesario (Resh, 2001). Fue desarrollada durante la década de los sesenta por Allen Cooper para mejorar la oxigenación de las raíces. Se basa en la manutención de una delgada lámina o capa de solución nutritiva que continuamente está en recirculación, pasando a través de las raíces de las plantas. De esta forma, las plantas absorben agua, nutrientes y oxígeno. Esta lámina idealmente no debería alcanzar una altura superior a 4-5 mm para favorecer la aireación de la solución y las raíces (Urrestarazú, 2004). La lámina de solución de nutrientes nunca debe elevarse por encima de la masa radicular. Esto asegurará que todas las raíces estén húmedas, pero también que su superficie superior esté en contacto con el aire (Resh, 2001). El flujo recomendado es de 1 a 4 l/min lo que permite que las raíces de las plantas posean una oferta adecuada de oxígeno, agua y nutrientes. La solución nutritiva se oxigena al caer abruptamente sobre el remanente de disolución en el estanque colector en donde se produce la turbulencia (Urrestarazú, 2004). Además, en algunos sistemas productivos se utilizan oxigenadores complementarios. Por tratarse de un sistema cerrado, es importante monitorear la concentración de nutrientes de la solución nutritiva y recargar los niveles del sistema. La pendiente longitudinal de los canales de cultivo permite el retorno de la solución nutritiva al estanque colector. Generalmente ésta oscila en 2% (Urrestarazú, 2004). Para favorecer la oxigenación de las raíces es aconsejable extender la longitud de los canales de cultivo hasta 15 m. A mayor longitud de canales, la concentración de oxígeno disuelto en la disolución disminuye, afectando el crecimiento y desarrollo de las plantas ubicadas en el extremo terminal del canal (Urrestarazú, 2004). Como el tejido de las raíces continúa creciendo, se dificulta el flujo de la solución y a muchas de ellas les falta el oxígeno después de una longitud crítica. Por esta razón, es mejor mantener los canales moderadamente cortos (Resh, 2001). El ancho de los canales debe ser de 15 a 30 cm dependiendo del cultivo. Los canales más estrechos son aptos para plantas pequeñas como lechugas (Resh, 2001).

Los elementos que conforman un sistema NFT son: tanques de almacenamiento de la solución, caños perforados por donde circula la solución y sirven de sostén a las plantas, bombas que envían la solución nutritiva del tanque hacia los caños y una cañería de retorno por donde

vuelve la solución que no fue absorbida hacia el tanque de almacenamiento.

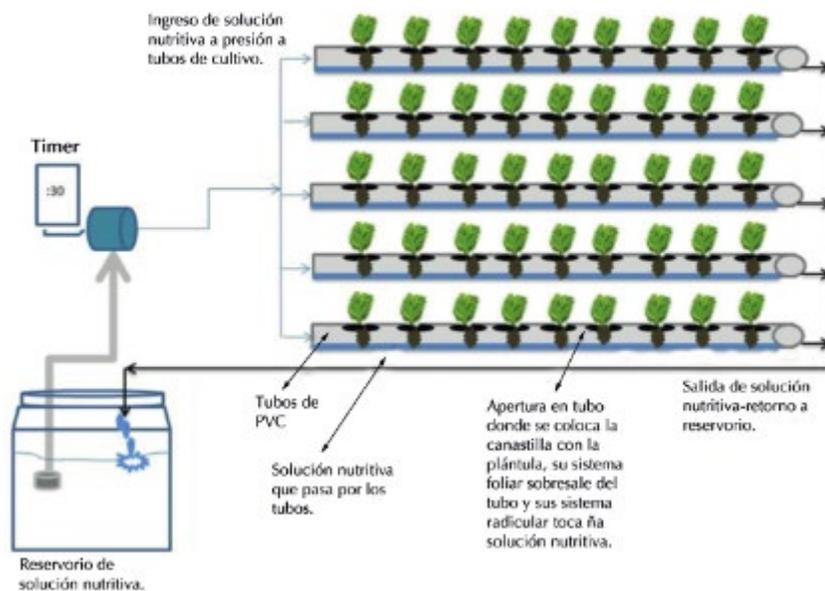


Figura 4. Modelo de sistema NFT.

Fuente: Brenes y Jiménez (2014).

2.4.VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA HIDROPONIA

Realizándose en ambiente controlado, la hidroponía permite a los productores manipular los factores con mayor impacto en el crecimiento de las plantas, como O_2 , CO_2 , agua, temperatura, nutrición mineral y luz. Debido a la posibilidad de controlar tantos factores ambientales, un productor puede extender la temporada de crecimiento y ubicar instalaciones de producción en áreas sin mucha tierra cultivable donde la producción de campo no podría ocurrir (Bisbis et al., 2018).

Una ventaja central de los cultivos hidropónicos es que permiten la independencia del cultivo del suelo que, como un medio natural, es heterogéneo, aloja patógenos, tiende a degradarse en sistemas de monocultivo y puede ser infértil, salino (Savvas y Gruda, 2018). Además, posibilitan ampliar el horizonte agrícola incluyendo

áreas urbanas y suburbanas para la producción (Gilsanz, 2007). Este tipo de cultivo disminuye el uso de pesticidas y otros agroquímicos y es una alternativa segura y eficaz a la desinfección del suelo (Savvas y Gruda, 2018). Otra ventaja es que este sistema de cultivo evita la labranza y preparación del suelo (Savvas et al., 2013), no es necesaria la rotación de cultivos, se evita la aparición de malezas y no existe la competencia por nutrientes (Gilsanz, 2007). Wohanka (2002) señala que en los sistemas cerrados es posible filtrar y desinfectar la solución nutritiva de drenaje para evitar la diseminación de patógenos (filtración por membranas o arena, tratamiento con ozono o UV o microorganismos benéficos). En los cultivos sin suelo es posible optimizar las características físicas y químicas del entorno de la raíz. Como resultado pueden obtenerse productos de elevada calidad con mayores rendimientos a un costo de producción razonable, minimizando el uso de pesticidas (Savvas y Gruda, 2018). Esto también es avalado por Resh (2001) que señala que la mayor eficiencia en la nutrición, los menores costos de desinfección del medio y la mayor densidad de la plantación en los cultivos hidropónicos conducen a un mayor rendimiento de las cosechas frente al cultivo tradicional.

Beltrano (2015) destaca los altos rendimientos por unidad de superficie que es posible obtener con hidroponía debido al aceleramiento en el proceso de cultivo y la posibilidad de cosechar repetidamente la misma especie de planta al año. Ibrahim y Zuki (2013) reportaron que la lechuga cultivada en sistema hidropónico produjo mayor biomasa que en cultivo en suelo, con mayor velocidad de crecimiento y calidad. Barbosa et al. (2015) refieren rendimientos comparativos de $3,9 \text{ kg.m}^2.\text{año}^{-1}$ para cultivo convencional contra $41 \text{ kg.m}^2.\text{año}^{-1}$. Fontana y Nicola (2009) evidencian que la producción de rúcula en cultivo hidropónico cuadruplica el rendimiento respecto al cultivo tradicional.

En los cultivos hidropónicos, la solución nutritiva que suministra el agua y nutrientes puede ser reciclada aumentando la eficiencia en el uso del agua y fertilizantes y minimizando los impactos ambientales de los residuos de fertilización (Savvas y Gruda, 2018, Beltrano, 2015).

El cultivo en hidroponía permite producir material limpio en la cosecha y reducir operaciones de lavado cuando la materia prima se procesa en la industria de corte fresco. El ciclo más corto de las hortalizas cultivadas reduce los riesgos de ataques de parásitos y propagación de enfermedades por todo el cultivo (Fontana y Nicola, 2009, Beltrano, 2015). Ibrahim y Zuki (2013) indican que la aceptabilidad basada en tests

sensoriales en cuanto a la forma, color y textura de la lechuga hidropónica fue significativamente mejor que la cultivada en suelo. También demostraron una mayor calidad post cosecha comparada con el cultivo en suelo.

En otro orden Puerta (2020) señala como ventaja el incremento del bienestar de los trabajadores, ya que mejora la ergonomía de todas las operaciones.

Una de las principales desventajas de la hidroponía es el elevado costo inicial para la instalación y puesta en marcha del sistema (Beltrano, 2015, Gilsanz, 2007) así como los altos costos energéticos (Barbosa et al., 2015). Los costos variarán dependiendo del sistema elegido y del control que se desee realizar del ambiente de crecimiento. Si vamos a sistemas donde se controla la temperatura, humedad y luz del lugar de crecimiento del cultivo, tendremos mayores grados de inversión. Por otro lado, sistemas que requieran un aporte energético, como los sistemas circulantes, diferirán en los costos de aquellos sistemas flotantes o estáticos. La infraestructura y la operativa de estos sistemas se asocia a mayores requerimientos técnicos que no siempre están disponibles en las zonas de producción (Beltrano, 2015). Otra desventaja se asocia a que son sistemas totalmente dependientes de insumos externos.

En estos sistemas es indispensable contar con agua de buena calidad, libre de contaminantes y de excesivas sales (Gilsanz, 2007). En el caso del NFT existe el riesgo de colapso de los cultivos ante fallas técnicas, debido al escaso volumen de solución nutritiva por planta (Savvas y Gruda, 2018). Al no existir suelo se pierde la capacidad buffer de éste frente a excesos o alteraciones en el suministro de nutrientes, es por ello que de forma inmediata se presentan los síntomas tanto de excesos como de déficits nutricionales. El productor deberá estar muy atento al equilibrio de la fórmula nutritiva y a sus cambios durante el ciclo. Esto exige un control diario de la solución nutritiva (pH, conductividad eléctrica, oxigenación, drenajes, etc.) (Urrestarazú, 2004). Un factor limitante en los sistemas de cultivo cerrados es la acumulación de iones de sodio en la solución recirculante (Sonneveld, 2002).

2.5.FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS EN HIDROPONÍA

2.5.1. Temperatura ambiente

Gent (2016) cultivó lechuga hidropónica bajo luz solar natural a dos diferentes temperaturas mínimas del aire en un invernadero (10 °C / 20 °C). La tasa de crecimiento relativo y el peso fresco a mayor temperatura fueron más altos, pero bajo la temperatura más fría, el contenido de materia seca fue mayor. El azúcar, el ácido málico y el potasio fueron significativamente más altos a la temperatura más baja. Sin embargo, la concentración de nitrato fue un 40% más alta a mayor temperatura en comparación con la temperatura más fría. Estos resultados indican que la temperatura tiene efectos sobre el crecimiento, la composición y la absorción de nutrientes de las lechugas.

Se ha descrito una fuerte disminución en la absorción de diversos nutrientes como N, P, K y Ca en cultivos hidropónicos cuando la temperatura baja a unos 10-13 °C. También se ha observado que cuando la temperatura es de unos 20-25 °C (hasta los 30 °C) se incrementa fuertemente esta absorción, no existiendo una gran fluctuación dentro de estos márgenes. Por encima de estas temperaturas, no se permite un buen desarrollo de las plantas en cultivos hidropónicos provocando algunos efectos no deseados como la floración en los cultivos de lechuga (Urrestarazú, 2015).

2.5.2. Radiación solar

La intensidad lumínica es el factor principal que afecta la fotosíntesis y las temperaturas ambientales durante el día. La absorción de agua y nutrientes generalmente aumentan a medida que la intensidad lumínica y la temperatura del aire se elevan. Sin embargo, a temperaturas muy altas los cultivos tienden a marchitarse y la absorción de agua es incapaz de mantener la turgencia de las hojas (Resh, 2001).

Según Urrestarazú (2015) el déficit de oxígeno en las raíces depende de las condiciones térmicas de la solución nutritiva que a su vez dependerá del nivel de radiación externa del cultivo. La variación del contenido de oxígeno en la solución nutritiva está asociada a la actividad respiratoria de las raíces y depende de la especie. Para un mismo nivel de radiación solar los niveles de oxígeno serán más bajos por la tarde que por la mañana como consecuencia de un aumento de la temperatura de la

solución nutritiva. El contenido de oxígeno disminuye además en el curso del día debido al aumento de la demanda respiratoria de las raíces a medida que aumenta la radiación solar (Urrestarazú, 2015).

La radiación es el factor principal que afecta la tasa de crecimiento relativo de la lechuga (Gent, 2014). La tasa de fotosíntesis de la lechuga aumenta con la intensidad de la luz (Park y Lee, 2001). La intensidad de la luz modula el consumo y la reducción del nitrato y es el factor principal que controla la acumulación de nitratos en las hojas (Khan et al., 2018).

2.5.3. Humedad relativa

Cuando nos referimos a la humedad del aire, normalmente se expresa en términos de humedad relativa (HR). Esto se debe a que la cantidad absoluta de agua que contiene el aire fluctúa constantemente con la temperatura. La humedad relativa se expresa como el porcentaje de vapor de agua en el aire, en comparación con la cantidad total de agua que podría contener el aire si estuviera saturado.

El déficit de presión de vapor (DPV) es más preciso para determinar la pérdida de agua de la planta. DPV simplemente es la diferencia entre la presión de vapor dentro de la hoja, en comparación con la presión de vapor del aire. Si el DPV es alto, lo que significa que la presión de vapor dentro de la planta es mayor que el aire exterior, entonces más vapor de agua escapa a través de las estomas. Este proceso de pérdida de agua a través de las hojas se llama transpiración. Si el DPV es bajo la planta disminuye su consumo de agua y fertilizante (Parent, 2021).

La humedad afecta dos funciones principales de las plantas:

- a) Transpiración: Mientras más baja la HR o más alta sea la temperatura del aire, más rápida es la tasa de transpiración de la planta que sólo puede aumentar hasta cierto nivel, luego del cual la planta se marchitará (Peery, 2016).

El movimiento del aire sobre la superficie de la hoja elimina el vapor de agua y aumenta el potencial hídrico favoreciendo la transpiración. Si la velocidad del viento es alta, la transpiración disminuye al producirse un cierre estomático por perturbación mecánica o desecación de la hoja (Sutcliffe, 1984).

Por otro lado, si el aire es muy húmedo, la planta no absorbe mucha agua del sustrato, lo que también significa que hay poca absorción de nutrientes. Esto es un problema para algunos elementos, particularmente el calcio, ya que solamente se mueve por vía xilemática y una absorción inadecuada puede provocar deficiencias en los tejidos en formación (Parent, 2021).

- b) Fotosíntesis: Cuando la temperatura es alta y la humedad es normal, se abrirán más estomas que dejarán entrar dióxido de carbono para una fotosíntesis activa. Si el aire es excesivamente seco y la planta se está marchitando, las aberturas de las estomas se cierran, por lo que se reduce la actividad fotosintética y finalmente, el crecimiento de la planta (Parent, 2021).

2.6.SOLUCIÓN NUTRITIVA

El manejo de la concentración de nutrientes es vital y un determinante fundamental en el rendimiento y la calidad de los vegetales cultivados en los sistemas de producción sin suelo (Fallovó et al., 2009). La solución de nutrientes contiene todos los elementos esenciales que necesita la planta para su normal crecimiento y desarrollo (Resh, 2001). Está compuesta por fertilizantes disueltos en el agua de riego. En los cultivos hidropónicos las sales fertilizantes deberán tener alta solubilidad puesto que deben permanecer en solución para ser tomadas por las plantas (Resh, 2001).

Según Navarro y Navarro (2014), entre el 94 y el 99,5 % del organismo vegetal se compone de tres elementos: C, H y O que se obtienen directamente del aire por fotosíntesis o del agua del suelo. Entre el 0,5 y el 6% restante está constituido por elementos minerales esenciales para la nutrición de la planta, que se absorben por las raíces. De los elementos esenciales, los requeridos en cantidades relativamente grandes se denominan macronutrientes y son: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. El resto de los elementos se requieren en muy pequeñas cantidades y son llamados micronutrientes, estos son: cloro, hierro, manganeso, boro, cobre, zinc y molibdeno.

Según Carbone (2015) algunas funciones de los macronutrientes son las siguientes:

- El nitrógeno es el elemento más abundante luego del C, H y O formando parte de las proteínas, de organoides (cloroplastos, mitocondrias y peroxisomas) donde ocurren numerosos procesos metabólicos. Es constituyente de las membranas plasmáticas y de pigmentos y hormonas vegetales. Forma parte del ARN y ADN. Cuando su aporte es restringido disminuye el crecimiento y la productividad.
- El fósforo es un constituyente fundamental de los ácidos nucleicos y nucleótidos. Interviene en reacciones metabólicas promoviendo potencial de reducción a través del NAD y NADP. Forma parte del ADP y ATP. Los fosfolípidos componen las membranas celulares y juegan un rol importante en la absorción de nutrientes.
- El potasio es el único nutriente esencial que no forma ninguna estructura química en la célula vegetal. Cumple un rol fundamental en la economía del agua de la planta a través de su rol en la apertura y cierre estomático. Es un activador de procesos metabólicos jugando un papel esencial en la fotosíntesis y en la respiración.
- El ion magnesio constituye un elemento estructural en la molécula de clorofila y cumple un rol fundamental en el metabolismo energético como cofactor de enzimas. Promueve la absorción y translocación del P en la planta.
- El azufre forma parte de los aminoácidos esenciales cistina, cisteína y metionina y de compuestos como biotina, tiamina y coenzima A que actúan como cofactores o coenzimas en numerosos procesos del metabolismo vegetal como es la respiración, síntesis y degradación de los ácidos grasos.
- El calcio es utilizado en la síntesis de la pared celular siendo el componente estructural de la laminilla media, que separa las células recién formadas. Participa en la formación del huso mitótico, en la división celular y es necesario para el normal funcionamiento de las membranas celulares. Actúa como segundo mensajero en respuesta a señales ambientales y hormonales y como cofactor de numerosas enzimas.

Según Urrestarazú (2015), en una solución nutritiva se debe aportar no solo la cantidad de agua sino todos y cada uno de los iones fertilizantes en su proporción correspondiente. Se debe tener en cuenta:

- a) la concentración individual de cada nutriente
- b) la relación entre ellos
- c) los iones que existen en la rizósfera en ese momento
- d) el tipo de cultivo
- e) el estado fenológico del mismo
- f) los objetivos del agricultor y los técnicos que asesoran el cultivo.

De acuerdo a Rodríguez et al. (2001), una planta con deficiencia de algún elemento esencial muestra un desorden fisiológico con síntomas característicos. Los síntomas de deficiencia más observados son clorosis, necrosis, deformación de hojas, coloración diversa y retardo en el crecimiento. La deficiencia puede ser absoluta, cuando el elemento está en muy bajas concentraciones en la solución nutritiva y no cubre la demanda de la planta; la deficiencia es inducida cuando el elemento está en la solución pero no se encuentra disponible, debido, por ejemplo a un inadecuado pH. Un desbalance de un elemento esencial en exceso, puede conducir a deficiencia de otros elementos interfiriendo con su absorción (antagonismo). A su vez un incremento en la concentración de un elemento puede provocar el aumento de otro (sinergismo).

Los requerimientos de los elementos minerales cambian durante el crecimiento y desarrollo del cultivo e incluso dentro de las variedades de un mismo cultivo. Los niveles de nutrientes en ciertos estados de desarrollo influyen sobre el rendimiento del producto económico de un determinado cultivo (hojas, frutos, etc). Hortalizas de hoja como lechuga requieren más nitrógeno, hortalizas que producen frutos como tomates o pepinos requieren más fósforo y potasio en la solución nutritiva, que inducirán la floración y fructificación. Cultivos que producen tubérculos requieren más potasio que promueve tuberización y formación de raíces reservantes (Rodríguez et al., 2001).

De acuerdo a Urrezarazú (2015), se pueden resumir los objetivos del fertirriego de la siguiente forma:

- Suministrar el nivel necesario de cada nutriente y mantener el equilibrio nutricional en cada fertirriego evitando tanto la carencia como acumulación para el crecimiento óptimo. Concentraciones altas de macronutrientes son menos tóxicas que concentraciones altas de micronutrientes que tienen un margen estrecho entre concentración óptima y toxicidad (Figura 5).

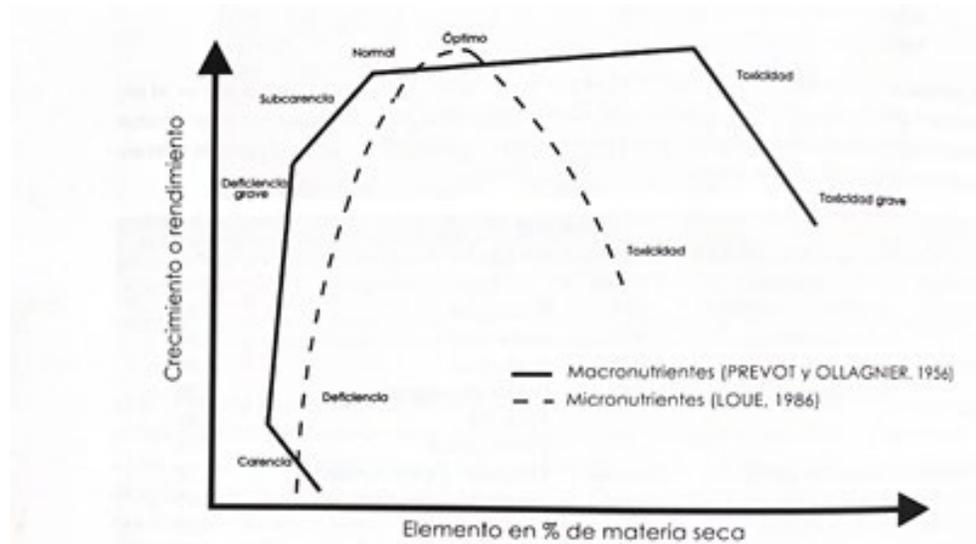


Figura 5. Esquema del crecimiento o rendimiento de la planta en función de la presencia de un elemento esencial.

Fuente: tomado de Urrestarazú (2015).

- Garantizar el equilibrio nutricional (interacción entre los elementos nutritivos) para favorecer el desarrollo óptimo de las plantas.
- Una buena aireación para que las raíces realicen la respiración radicular.
- Mantener la temperatura dentro de los niveles apropiados para cada especie.
- Mantener la disponibilidad de agua fácilmente disponible, o sea a tensiones de retención bajas.
- Mantener la homogeneidad o uniformidad de los cinco objetivos anteriores por todo el contenedor donde se desarrollen las raíces.

Según Urrestarazú (2015), para fabricar la solución es importante disponer del análisis del agua y de la concentración de solución ideal que se quiere alcanzar para el logro de los fines del fertirriego. Así se pueden tener en cuenta los nutrientes que ya aporta el agua en forma de iones al tenerlos disueltos.

Los pasos a seguir en la fabricación son:

- 1) Elección de una solución nutritiva.
- 2) Descontar los iones nutritivos presentes en el agua de riego al cómputo final de nutrientes a aportar por los fertilizantes.
- 3) Ajustar las concentraciones de fertilizantes a aportar para obtener las concentraciones de nutrientes deseadas (solución final).
- 4) Calcular y disolver en los tanques (mínimo dos más uno de ácido) los pesos o volúmenes de cada fertilizante a disolver o añadir en el cabezal de riego.

2.6.1. Calidad del agua en hidroponia

Según Van Os et al. (2016), el cultivo hidropónico requiere una excelente calidad del agua. Siempre es recomendable analizar el agua antes de iniciar un cultivo. En particular, niveles altos de sodio y bicarbonato pueden alterar el crecimiento de las plantas. La salinidad afecta el rendimiento, dependiendo de la tolerancia del cultivo.

El sodio está presente en el agua, pero solo pequeñas cantidades son absorbidas por las plantas. Si la concentración de sodio es elevada en la zona de la raíz, afecta negativamente a los cultivos interfiriendo en la absorción de agua y nutrientes por el efecto osmótico y se debe descartar la solución nutritiva a fin de prevenir reducciones en el rendimiento o en la calidad de los productos. El descarte de la solución resulta en pérdidas de nutrientes, de agua y en una contaminación ambiental (Van der Lugt et al., 2020). La causa principal de la acumulación de sodio de la solución nutritiva es el contenido de sal del agua de irrigación. El contenido de sodio de los fertilizantes es muy bajo para contribuir a la acumulación de sodio (Van der Lugt et al., 2020).

Niveles elevados de sulfato pueden causar precipitaciones cuando los cationes de los fertilizantes están concentrados, lo que puede evitarse preparando las soluciones concentradas con agua de lluvia o tratada con ósmosis inversa. El nivel de sulfatos en el agua utilizada deberá ser menor a 3 mmol l^{-1} (Van Os et al., 2016).

Gilsanz (2007) señala que el agua deberá estar exenta de contaminantes microbianos que puedan ser perjudiciales para la salud humana.

2.6.2. Fertilizantes

El R.D. 506/2013, citado por Navarro y Navarro (2014), define al fertilizante como: producto utilizado en agricultura o jardinería cuya función principal es proporcionar elementos nutrientes a las plantas, que facilita el crecimiento y aumenta su rendimiento y mejora la calidad de las cosechas.

Algunos de los fertilizantes más utilizados en hidroponía se pueden ver en el Cuadro 2. Como se mencionó anteriormente en hidroponía es importante la elección de fertilizantes de alta solubilidad.

Cuadro 2. Sales fertilizantes usadas en Hidroponía.

Nombre químico	Fórmula química	Solubilidad (gramos por litro)
Nitrato de calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	1220
Nitrato de potasio	KNO_3	130
Nitrato de magnesio	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	279
Fosfato monopotásico	KH_2PO_4	230
Sulfato de magnesio	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	710
Sulfato de potasio	K_2SO_4	111
Sulfato de manganeso	MnSO_4	980
Acido bórico	H_3BO_3	60
Sulfato de cobre	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	310
Sulfato de zinc	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	960
Molibdato de amonio	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	430

Fuente: Carrasco e Izquierdo (1996).

Para formular la solución nutritiva se debe tener en cuenta el grado de pureza del fertilizante y si es o no compatible al mezclarlo en agua con otros fertilizantes (Rodríguez et al., 2001). Se debe evitar mezclas de sales que puedan generar precipitados interfiriendo con la disponibilidad de nutrientes. La práctica estándar es utilizar dos tanques conteniendo dos diferentes soluciones madre a fin de separar el

calcio de los fertilizantes que contienen sulfato y fosfato y así evitar la precipitación debida a la baja solubilidad de los sulfatos y fosfatos de calcio (Sonneveld y Voogt, 2009).

Algunos fenómenos fisicoquímicos alteran la disponibilidad de nutrientes para las plantas los más importantes son la precipitación, la co-precipitación y formación de complejos. El uso de quelantes (EDTA, DPTA, EDDHA y citrato) pueden aumentar la estabilidad de algunos elementos en solución especialmente hierro, cobre y zinc (Meselmani, 2022).

La calidad de un fertilizante se puede evaluar a través de algunas propiedades físicas y químicas que tienen relevancia agronómica. El grado, la granulometría, las formas químicas de nutrientes y su aptitud para la mezcla física, son algunos de los atributos que se pueden analizar para determinar el valor agronómico de un fertilizante (Navarro y Navarro, 2014).

2.6.3. Fórmulas de solución nutritiva

En el Cuadro 3 se muestran formulaciones de diferentes autores para el cultivo de lechuga en hidroponia.

Cuadro 3. Concentraciones de nutrientes en soluciones nutritivas para lechuga según diferentes autores.

Autores	NO₃	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	B	Zn	Cu	Mo
	mmol.l ⁻¹						μmol.l ⁻¹					
Furlani, 1998	14,1	1,3	4,7	3,5	1,6	1,6	35,8	7,3	27,7	0,9	0,3	0,6
La Molina, 2001	11,0	1,2	6,6	3,7	1,9	2,2	17,9	9,1	46,2	2,3	1,6	0,5
Morgan, 1999	10,1	0,8	2,5	3,8	1,0	1,0	44,8	18,2	41,6	0,9	0,8	0,5
Resh, 2001	13,6	1,6	5,4	5,0	1,6	3,5	89,5	9,1	46,2	1,5	1,6	0,5

Fuente: Rodríguez et al. (2001).

Según Resh (2001), una formulación óptima dependerá de las siguientes variables:

1. Especie y variedad de la planta
2. Estado de desarrollo de la planta
3. Parte de la planta que será cosechada (raíz, tallo, hoja, fruto).
4. Estación del año-duración del día.
5. Clima-temperatura, intensidad de luz, horas de sol.

La relación entre el consumo de nutrientes y de agua puede variar bajo distintas condiciones climáticas. Esto conlleva a que la composición óptima de una solución nutritiva dependa también de las condiciones climáticas locales (Savvas y Gruda, 2018).

2.6.4. Salinidad de la solución

La concentración de sales disueltas en la solución nutritiva se mide a través de la conductividad eléctrica (CE) y es un factor fundamental de la solución nutritiva para el éxito del cultivo (Meselmani, 2022). La contribución a la CE general de la solución depende de los iones que se producen tras la disolución de los fertilizantes (Urrestarazú, 2015).

La conductividad eléctrica crece no sólo por las concentraciones de sales presentes, sino también por la composición química de la solución de nutrientes. Algunas sales de fertilizantes conducen la electricidad mejor que otras (Resh, 2001). Un ejemplo de esto es que las sales que aportan amonio pueden proporcionalmente contribuir en mayor medida al aumento de la CE que las mismas sales con el catión de magnesio (Urrestarazú, 2015).

El manejo de la disolución se basa en la estimación de la concentración de nutrientes a través de la conductividad eléctrica, utilizando un sistema automático o portátil controlador de la CE. Si existe una gran acumulación de elementos no esenciales interfiere con la estimación del contenido de los elementos requeridos por las plantas (Carrasco, 2004).

En cuanto a las soluciones nutritivas en sistema NFT, Carrasco (2004) sostiene que uno de los aspectos a considerar es la incorporación mínima de elementos minerales no esenciales para el crecimiento de las plantas, ya que la acumulación de iones indeseables incrementa la concentración de sales de manera innecesaria, que de llegar a un nivel límite, inhibe la absorción de agua por las plantas.

La concentración iónica relaciona la CE de la disolución nutritiva con su presión osmótica y cuando ésta es muy alta surgen problemas propios del estrés salino (Urrestarazú, 2004).

En estudios de Samarakoon et al. (2019) con cultivares de lechuga Salanova® (cultivares Manteca Verde, Manteca Roja) en NFT se observó un rendimiento máximo a una CE de $1,8 \text{ mS cm}^{-1}$. La absorción de nitrógeno y potasio por las hojas aumenta con el aumento de CE, sin embargo, no aumenta el rendimiento por encima de $1,8 \text{ mS cm}^{-1}$ CE. El contenido de fósforo, Ca, Mg, S, Mo y Mn de las hojas aumentó con una CE de 1,2 hasta $1,8 \text{ mS cm}^{-1}$ sin embargo, se mantuvo similar entre $1,8$ y $2,4 \text{ mS cm}^{-1}$.

Yost (2021) recomienda cultivar la rúcula a una CE de hasta $2,0 \text{ mS cm}^{-1}$ no observándose mayores rendimientos por encima de esa CE.

2.6.5. pH

El pH es otro factor a considerar en el manejo de la solución nutritiva ya que entre pH 5,5 y 6,5 los elementos minerales esenciales para las plantas se encuentran en su máxima disponibilidad. Por esta razón en hidroponía se aplican soluciones ácidas para mantener el pH en el rango señalado (Carrasco, 2004).

El control de pH en hidroponía puede ser efectuado por dos métodos usualmente empleados de forma combinada: el primero es para neutralizar el agua o solución nutritiva con ácido mineral como HNO_3 y/o H_3PO_4 . El ácido fosfórico permite alguna capacidad tampón a la solución, pero es difícil evitar innecesarios altos niveles de P en la solución cuando este ácido se emplea continuamente, aún con proporciones de 3:1 de ácido nítrico: ácido fosfórico. El segundo método de control de pH es la inclusión de $\text{NH}_4\text{-N}$ en la formulación de la solución (Urrestarazú, 2004).

Urrestarazú (2015) plantea que podría recurrirse a otros ácidos como sulfúrico o clorhídrico pero esto tiene como inconveniente el aporte de iones sulfato y cloruro que frecuentemente se presentan en concentraciones importantes en las aguas de riego.

El pH de la solución es importante porque controla la disponibilidad de las sales fertilizantes. Un pH de 5,8 se considera óptimo para el cultivo de lechuga, sin embargo, un rango de 5,6 a 6,0 es aceptable. Las deficiencias de nutrientes pueden ocurrir en rangos por encima o por debajo del rango aceptable (Brechtner y Both, 2013).

Si el pH de la zona de la raíz en los cultivos sin suelo es superior a 7,0 pueden ocurrir deficiencias de P, Mn, Cu y Zn. Por otra parte, a niveles de pH por debajo de 5,0, existe un alto riesgo de toxicidad por Mn y / o Al, así como lesión directa por H^+ en los tejidos de la raíz (Islam et al., 1980). Además, si el pH bajo en la zona de la raíz se acompaña de una concentración excesivamente alta de NH_4-N , la absorción de Ca puede verse afectada (Sonneveld y Voogt, 2009).

2.6.6. Temperatura de la solución

La temperatura en la raíz afecta la morfología de la planta, la respiración, transpiración, movimiento del agua y el consumo de nutrientes en la lechuga (Gent, 2016). Urrestarazú (2015) refiere que en condiciones ambientales cálidas desciende la concentración de oxígeno en las horas centrales del día en un sistema NFT (Figura 6). Pequeñas diferencias de saturación de oxígeno afectan sensiblemente la producción del cultivo por lo cual se debe extremar el control del oxígeno disponible.

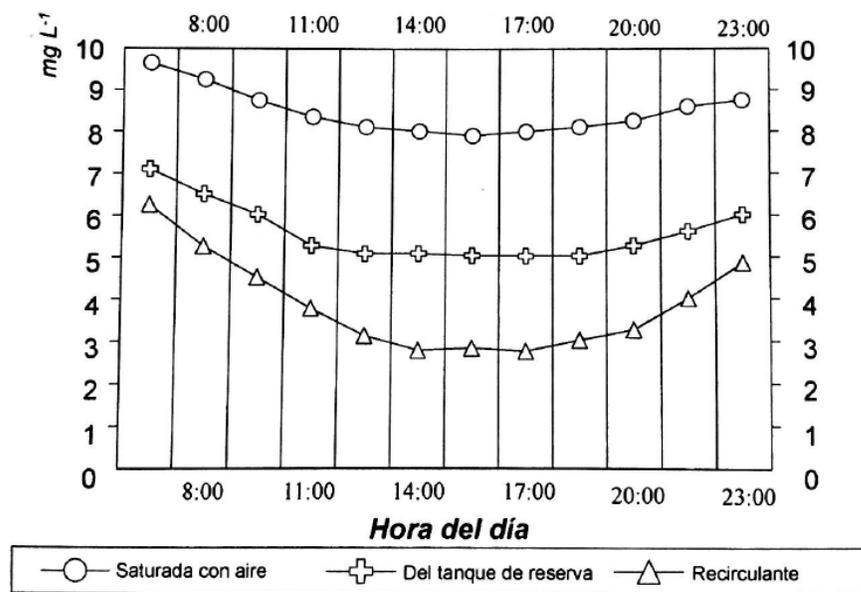


Figura 6. Contenido medio de oxígeno disuelto en la solución nutritiva en función de las horas del día en un sistema de cultivo NFT.

Fuente: Gislerod y Adams (1983).

Cuadro 4. Solubilidad del oxígeno de acuerdo con la temperatura.

Temperatura (°C)	Solubilidad del oxígeno en agua pura (mg*L ⁻¹)
10	11,29
15	10,08
20	9,09
25	8,26
30	7,56
35	6,95
40	6,41
45	5,93

Fuente: Trejo-Téllez y Gómez-Merino (2012).

En el cuadro 4 se observa el descenso de la solubilidad de oxígeno con el ascenso de la temperatura. El contenido de O₂ de una solución nutritiva afectará la tasa de actividad y función de las raíces, particularmente la tasa de absorción de agua y elementos nutritivos. Una de las principales razones por las que algunos sistemas NFT fallan, se debe a la incapacidad del sistema operativo para mantener suficiente O₂ en la masa de raíces en constante expansión en el canal NFT. Esta es también la razón por la que el tamaño y la longitud de la cubeta NFT pueden ser un factor crítico, ya que al final de la corrida puede quedar poco o nada de O₂ en la solución nutritiva (Benton Jones, 2014).

La solución nutritiva a una temperatura debajo de 20°C permitiría mantener la cantidad de oxígeno disuelto en el agua en parámetros óptimos (6 mg l⁻¹) (Rusu et al., 2021). Según Msayleb (2014), mantener la concentración de oxígeno disuelto en agua por encima de 6 mg l⁻¹ previene el crecimiento de microorganismos en la solución nutritiva. Goto et al. (1996) refieren que la concentración crítica de oxígeno disuelto para el cultivo de lechuga en un sistema hidropónico flotante es por debajo de 2,1 mg l⁻¹. Para Zeroni et al. (1983), el valor de referencia de 3 a 4 mg l⁻¹ de oxígeno disuelto en la solución nutritiva es el límite inferior recomendado para un cultivo hortícola en NFT.

La temperatura óptima para el cultivo de lechuga mantecosa en hidroponia está entre 24/25 °C aire/solución nutritiva (Shi, 2019). Como regla general, la temperatura de la solución no debería ser marcadamente inferior a 20-25 °C. En días cálidos, con una elevada transpiración, temperaturas muy bajas en la zona de las raíces pueden conducir a un estrés en las plantas. Al mismo tiempo las bajas temperaturas pueden producir la precipitación de muchas sales, impidiendo su absorción. Sumado a lo anterior, las bajas temperaturas pueden reducir el crecimiento de las plantas (Castañares, 2020).

Currey (2018) indica que mantener la solución bien aireada o inyectar oxígeno para mantener una concentración adecuada y constante promueve un crecimiento del cultivo con mayor sanidad. De acuerdo con Martínez et al. (2012), el aumento de la oxigenación por métodos pasivos en sistemas hidropónicos recirculantes puede ser una opción para incrementar significativamente el rendimiento de lechuga. La circulación del agua, el entierro de los tanques de fertilización (en sistemas NFT) y el empleo de materiales con superficies claras son prácticas que permiten evitar el calentamiento excesivo de la solución y la reducción de la oxigenación (Castañares, 2020).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES DONDE SE REALIZÓ EL EXPERIMENTO

El estudio se realizó en los invernáculos de la Empresa VerdeAgua, ubicada en Montevideo rural, en la zona de Melilla por Camino Pirinchos a 500 m al Noreste de Camino Redención (Latitud 34°44'35.63"S y Longitud 56°18'33.29"O). La empresa se dedica a la producción de vegetales de hoja hidropónicos.

Se realizó el seguimiento de dos cultivos de lechuga y dos de rúcula cultivados en dos invernaderos (nombrados F1 y K2) de estructura metálica, con medidas de 51,2 m x 144 m (F1) y 100 m x 64 m (K2) (Figura 7). El primero de ellos, cuenta con una altura de 3,5 m hasta el canalón mientras que el segundo tiene 3 m al canalón. Cuentan con nylon difuso de 200 micrones de grosor que contiene filtro UV y tratamiento anti goteo. Además, tienen malla sombra de 50% en el interior del techo que se extienden controladas mecánicamente. La ventilación se realiza mediante ventanas laterales y cenitales cuya apertura es controlada a través de un tablero de control. Tanto la malla sombra como las ventanas laterales y cenitales se operan manualmente. El invernadero donde se realizaron las evaluaciones en lechuga tiene en el suelo rafia de color blanco que permite una mayor difusión de la radiación (Figura 8A).

En ambos invernaderos se determinó la transmisividad de radiación PAR de la estructura. Para ello, se realizaron mediciones de la radiación PAR en el interior y en el exterior a 1,5 m del suelo con un ceptómetro (marca AccuPAR modelo LP-80). En el invernadero que se cultivó la rúcula la transmisividad promedio del nylon fue 65%, mientras que en el invernadero que contenía a la lechuga fue de 53%. La medición se realizó en un día despejado a las 13:30 horas para el primer ciclo de cultivo.

A)



B)



Figura 7. (A) Vista exterior del Invernadero F1 y (B) del Invernadero K2.

A)



B)



Figura 8. (A) Vista interior del Invernadero F1 y (B) del Invernadero K2.

3.2.CULTIVOS DE LECHUGA Y RÚCULA EVALUADOS

Se evaluaron dos ciclos de cultivo de lechuga tipo Salanova y dos cultivos de rúcula. En el primer ciclo (otoño) la rúcula fue sembrada el 01/04/2019 y la lechuga el 16/03/2019. Las fechas de cosecha fueron para la rúcula el 29/04/2019 y para la lechuga el 21/05/2019. En el segundo ciclo estudiado (verano), la rúcula fue sembrada el 11/01/2020 y la lechuga el 23/12/2019. Las fechas de cosecha fueron para la rúcula del 11 al 13/02/2020 y para la lechuga el 8 y el 10/02/2020.

Se utilizó la variedad de lechuga Salanova Manteca Verde (Erasmus) de Rijk Zwaan. Se optó por estudiar esta variedad ya que es la lechuga más utilizada por la empresa VerdeAgua, y la que más le aporta al tipo de producto que se realiza (ensaladas listas para consumir). En cuanto a la rúcula, la variedad utilizada fue Astro de la empresa Sakata.

Los plantines se hicieron en mesas de siembra en almacigueras de 128 celdas utilizando turba como sustrato. Se realizó la siembra con sembradoras manuales de 128 orificios. Para la lechuga se colocó una semilla por celda mientras que para la rúcula se colocaron 10-12 semillas por celda. Luego de la siembra las almacigueras fueron regadas con agua mediante aspersores y fueron cubiertas con cartón. Al germinar se destaparon y se dejaron en mesa hasta que las plantas desarrollaron su primera hoja verdadera. En ese momento las almacigueras se colocaron en “piscinas”, mesas conteniendo un fondo de 1 cm de solución nutritiva permitiendo que comiencen a nutrirse y a adaptarse a la solución. Durante el primer ciclo (otoño) los plantines de lechuga permanecieron 14 días en piscina y los de rúcula 5 días. Durante el segundo ciclo (verano) los plantines de lechuga permanecieron 10 días en piscina y los de rúcula 4 días. Luego, las plantas de las almacigueras se trasplantaron en los orificios de los caños definitivos de NFT. La duración de las fases de cada ciclo se resume en el Cuadro 5. Para la lechuga la densidad fue de 25 plantas m⁻². Para la rúcula la densidad fue de 38 plantas m⁻².

En el primer ciclo se evaluaron tres sectores de 430 plantas para la lechuga y dos sectores de 728 plantas (orificios) para la rúcula. En el segundo ciclo se evaluaron dos sectores de 430 plantas para la lechuga y dos sectores de 602 plantas (orificios) para la rúcula.

Cuadro 5. Duración de los ciclos de cultivo de lechuga y rúcula.

Cultivo	Ciclo	Días desde siembra a trasplante en caño NTF	Días desde trasplante a cosecha	Días totales del ciclo
Lechuga	1	23	43	66
Lechuga	2	22	25-27	48
Rúcula	1	7	21	28
Rúcula	2	12	21	33

3.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA HIDROPÓNICO UTILIZADO

El sistema hidropónico utilizado es el NFT. En este caso consiste en caños de polipropileno dispuestos en sectores o mesas de plantación que tienen un 2 % de pendiente. Los sectores donde se cultivó la rúcula son de 11,5 m de largo x 1,6 m de ancho conteniendo 14 caños con filas de plantas a 11,4 cm entre ellas. Los sectores de lechuga son de 10 m de largo x 1,8 m de ancho. Los caños tienen perforaciones cada 22 cm donde van sostenidas las plantas y por dentro de los caños corre una lámina de solución nutritiva la cual está en contacto con las raíces de las plantas. Esta solución es enviada desde un tanque (mediante una bomba) e inyectada a través de goteros a los caños en donde están las plantas. El caudal de los goteros en cada caño es de 2 l/min. El remanente que las plantas no absorbieron es recolectado en un canal de retorno que junta la solución sobrante y vuelve al tanque pasando por una serie de filtros elaborados de manera artesanal con mallas finas, los cuales interceptan mayoritariamente turba y algunas raíces que se rompen en el trasplante.



Figura 9. Izquierda: sector de lechuga recién trasplantado. Derecha: sector de rúcula recién trasplantado.

3.4. SOLUCIÓN NUTRITIVA

La solución nutritiva empleada en los experimentos fue una solución comúnmente utilizada en el establecimiento VerdeAgua para vegetales de hoja. La solución contiene los siguientes macro y micro nutrientes:

- Macronutrientes: nitrógeno (NO_3^- , NH_4^+) fósforo (HPO_4^- , PO_4^{2-}), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y azufre (SO_4^{2-}).
- Micronutrientes: hierro (Fe^{+2}), cloro (Cl^-), boro (B^{+2}), cobre (Cu^{2+}), manganeso (Mn^{2+}), zinc (Zn^{2+}) y molibdeno (Mo^{+2}).

Los fertilizantes utilizados para formular la solución nutritiva son los que se muestran en el cuadro 6.

Cuadro 6. Fertilizantes utilizados con su grado de pureza y solubilidad.

Fertilizante	% Pureza	Solubilidad
Nitrato de Calcio - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	-	1147 g/l
Cloruro de Calcio - CaCl_2	-	745 g/l
Nitrato de Potasio - KNO_3	-	300 g/l
Cloruro de Potasio – KCl	77 %	330 g/l
Sulfato de Magnesio - MgSO_4	-	700 g/l
Fosfato monoamónico - $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	-	380 g/l
Hierro quelatado	-	120 g/l
Ácido Bórico - H_3BO_3	99,8 %	50g/l
Sulfato de Zinc - ZnSO_4	95,0 %	965g/l
Sulfato de Cobre - CuSO_4	96,0 %	317 g/l
Sulfato de Manganeso - MnSO_4	98,1 %	762g/l
Molibdato de Sodio Na_2MoO_4	99,0 %	440g/l

3.4.1. Combinación de fertilizantes

En el cuadro 7 se detalla la cantidad de fertilizantes que fueron utilizados para preparar 1000 l de solución concentrada de fertirrigación para el primer y segundo ciclo de estudio de ambos cultivos (lechuga y rúcula). Luego esta solución concentrada se diluyó hasta alcanzar una CE de $1,4 \text{ mS cm}^{-1}$ y $1,8 \text{ mS cm}^{-1}$ para el primer y segundo ciclo respectivamente (Cuadro 8).

Para el fertirriego se utilizó agua proveniente de OSE. El análisis completo de la misma realizado el 2/3/2020 se muestra en el cuadro 9.

Cuadro 7. Formulaciones utilizadas para la solución nutritiva concentrada a 3,9 mS cm⁻¹.

Fertilizantes	1er ciclo	2do ciclo
	g.1000 l ⁻¹	g.1000 l ⁻¹
Nitrato de potasio	730	750
Fosfato monoamónico	230	230
Sulfato de magnesio	720	725
Nitrato de calcio	1350	1350
Cloruro de Potasio	150	150
Cloruro de Calcio	120	140
Hierro EDTA	70	70
Ácido Bórico	6,000	6,800
Sulfato de Zinc	1,125	1,275
Sulfato de Manganeso	4,500	5,100
Sulfato de Cobre	0,900	1,020
Molibdato de sodio	0,225	0,255

Cuadro 8. Concentración de nutrientes en la solución concentrada y diluida aportados por las dos recetas usadas en los dos ciclos de cultivo (considerando los iones aportados por el agua de riego utilizada).

Nutriente	Receta 1 (1er ciclo)		Receta 2 (2do ciclo)		Unidades
	Concentrada	Diluida	Concentrada	Diluida	
Ce	3,9	1,4	3,9	1,8	mS cm ⁻¹
NH ₄ ⁺	3,0	1,1	3,0	1,4	mmol l ⁻¹
NO ₃ ⁻	20,7	7,4	20,8	9,6	mmol l ⁻¹
PO ₄ ³⁻	2,0	0,7	2,0	0,9	mmol l ⁻¹
K ⁺	9,0	3,2	9,2	4,3	mmol l ⁻¹
Ca ²⁺	7,0	2,5	7,1	3,3	mmol l ⁻¹
Mg ²⁺	2,8	1,0	2,9	1,3	mmol l ⁻¹
SO ₄ ²⁻	2,9	1,0	2,9	1,3	mmol l ⁻¹
Cl ⁻	3,4	1,2	3,6	1,6	mmol l ⁻¹
Na ⁺	1,6	1,6	1,6	1,6	mmol l ⁻¹
Fe	80,0	28,7	80,0	36,9	μmol l ⁻¹
B	96,9	34,8	109,9	50,7	μmol l ⁻¹
Zn	3,7	1,3	3,7	1,7	μmol l ⁻¹
Mn	19,8	7,1	22,4	10,3	μmol l ⁻¹
Cu	3,5	1,2	3,9	1,8	μmol l ⁻¹
Mo	1,3	0,5	1,5	0,7	μmol l ⁻¹

Cuadro 9. Análisis de agua de red (OSE).

<i>CE</i>	<i>NH₄⁺</i>	<i>NO₃⁻</i>	<i>PO₄³⁻</i>	<i>K⁺</i>	<i>Ca²⁺</i>	<i>Mg²⁺</i>	<i>SO₄²⁻</i>	<i>Cl⁻</i>	<i>Na⁺</i>
<i>mS cm⁻¹</i>	<i>mmol l⁻¹</i>								
0,39	0,1	0,1	0	0,1	0,5	0,3	0,8	0,5	1,6
<i>Fe</i>	<i>B</i>	<i>Zn</i>	<i>Mn</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>Al</i>			
<i>μmol l⁻¹</i>									
0,1	4,5	0,1	0,5	0,1	0	0,3			

La solución concentrada surge de la dilución de los fertilizantes en agua de red OSE a una conductividad de 3,9 mS cm⁻¹ aproximadamente, por lo que ya contiene sumadas las concentraciones de nutrientes de ambas fuentes. En las soluciones diluidas o de alimentación se señalan las concentraciones de nutrientes estimadas para una conductividad de 1,4 mS cm⁻¹ y 1,8 mS cm⁻¹ para el primer y segundo ciclo respectivamente. Las diferencias de estas conductividades fueron resultado de una decisión técnica de aumentar la conductividad de la solución nutritiva. Las concentraciones de nutrientes fueron calculadas en base a los valores de la conductividad.

3.4.2. Forma de preparación

Para la preparación de la solución nutritiva se utilizan tres tanques separados en donde se mezclan los diferentes fertilizantes teniendo en cuenta la solubilidad de cada uno y que los que se colocan en el mismo tanque no sean incompatibles entre sí, para evitar precipitados.

En el tanque 1 se coloca:

- a) Cloruro de calcio
- b) Nitrato de calcio

En el tanque 2 se coloca:

- a) Cloruro de potasio
- b) Nitrato de potasio

En el tanque 3 se coloca:

- a) Fosfato monoamónico
- b) Sulfato de magnesio
- c) Micronutrientes: ácido bórico, sulfato de manganeso, sulfato de zinc, sulfato de cobre y molibdato de sodio (previamente disueltos en agua destilada).
- c) Hierro

Se colocan los fertilizantes para preparar 20000 litros de solución concentrada a una conductividad de $3,9 \text{ mS cm}^{-1}$. El orden que se utiliza para la preparación de los tanques es incorporando en primer lugar los fertilizantes de menor solubilidad y luego los más solubles con excepción del hierro, que a pesar de tener baja solubilidad se coloca último ya que la coloración que da no permite visualizar el fondo del tanque y ver cómo se van disolviendo los fertilizantes anteriores.

Luego, a través de tres bombas dosificadoras (dosatrones), se inyectan los fertilizantes ya disueltos en un tanque donde se prepara la solución “madre” o solución concentrada ($\text{CE: } 3,9 \text{ mS cm}^{-1}$). El siguiente paso es enviar esa solución a los tanques de solución diluida o de alimentación, a la misma vez que se le agrega agua (con el pH ya corregido a pH 6) para llevarla a la conductividad deseada.

Los tanques de solución diluida o de alimentación son corregidos y recargados tres veces al día (en la mañana, al medio día y en la tarde), llevándolos a la conductividad y el pH deseados. La solución nutritiva se renueva periódicamente debido a la acumulación de iones no deseados. En el momento de la renovación se realiza la limpieza y desinfección del tanque.

3.5. MEDICIONES REALIZADAS

3.5.1. Conductividad, pH y temperatura de la solución nutritiva

Desde el trasplante a los caños definitivos en el sistema NFT, se procedió a tomar una muestra de la solución de entrada al sistema y una muestra de salida de cada sector en el que se tenían plantas en estudio. Se midió la conductividad, el pH y la temperatura de las muestras colectadas in situ. Los instrumentos que se utilizaron para

estas mediciones fueron medidores portátiles de pH y conductividad (los cuales también miden la temperatura) de la marca Oakton. Ambos instrumentos tienen compensación de temperatura automática y fueron calibrados dos veces por semana. Estas muestras y mediciones se realizaron dos veces al día en tres días a la semana hasta que se realizó la cosecha de los cultivos. Las muestras se tomaron lo más lejos posible de la corrección de la solución nutritiva y antes de la siguiente corrección.

3.5.2. Análisis de la concentración de cationes y aniones en solución

Un día a la semana, las muestras de solución que se tomaban según lo detallado en 3.5.1 se llevaron al INIA Las Brujas para realizar la medición de la concentración de nitrato $[\text{NO}_3^-]$ y potasio $[\text{K}^+]$ con los equipos LAQUAtwin (Horiba). Para el segundo ciclo se agregaron la medición de la concentración de calcio $[\text{Ca}^{2+}]$ y sodio $[\text{Na}^+]$ con LAQUAtwin (Horiba).

3.5.3. Acumulación de peso fresco, materia seca y consumo de potasio y nitrógeno

Una vez por semana se tomó una muestra de cinco plantas de lechuga y cinco plantas de rúcula (en este último cultivo, cuando se sembró se colocaron entre 10-12 semillas por celda). Las muestras de plantas fueron tomadas al azar. En el cultivo de rúcula, cada muestra comprendió plantas pertenecientes a cinco orificios de los caños de cultivo. Estas hojas se transportaron en conservadora con refrigerante a INIA Las Brujas donde se descartaron las raíces de las plantas y se midió el peso fresco de la parte aérea por planta en balanza. Posteriormente, se colocaron en bandejas en estufa ventilada a 60 °C hasta peso constante. Se determinó el peso seco de la parte aérea por planta. Luego, se armó una muestra compuesta conteniendo las cinco plantas individuales secas, se molieron y se enviaron al laboratorio de INIA Las Brujas para determinar potasio por espectrofotometría de emisión atómica y nitrógeno total por el método Kjeldahl.

3.5.4. Temperatura del aire y humedad relativa

En el momento que se trasplantó el cultivo a los caños definitivos, se colocaron sensores de temperatura y humedad relativa (marca Ibutton) ubicados 20 cm sobre los cultivos. Se programaron para registrar datos cada una hora. Estos sensores se retiraron en el momento de la cosecha de los cultivos. Con la información horaria se obtuvo la temperatura del aire y la humedad relativa ambiente media, mínima y máxima por día.

3.5.5. Radiación en el interior de los invernaderos

Se obtuvo la radiación incidente horaria de la Estación meteorológica de INIA Las Brujas ubicada a 10 km del sitio de evaluación. Esta información se corrigió con la transmisividad del invernadero (procedimiento detallado en sección 3.1) para obtener la radiación interior diaria.

4. RESULTADOS

4.1. EVALUACIÓN DE CONDICIONES AMBIENTALES

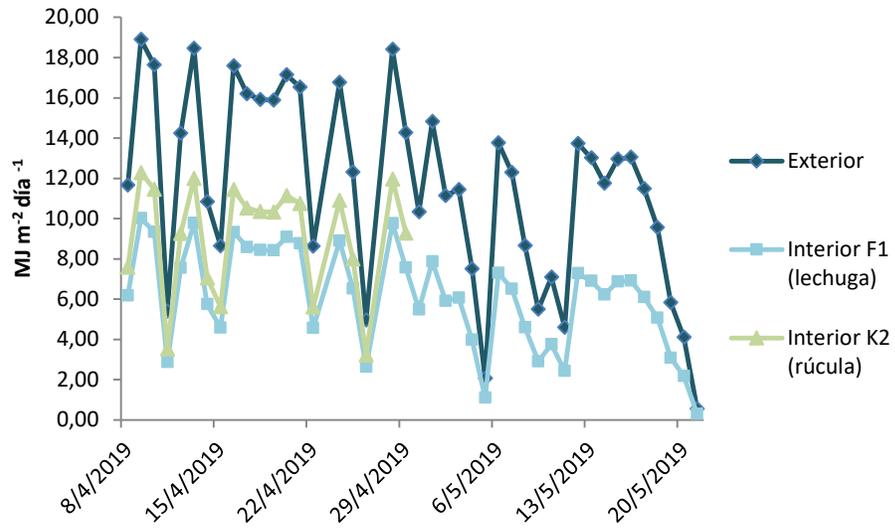
4.1.1. Radiación solar incidente

Los dos invernaderos utilizados (K2 y F1) presentaron diferencias en la radiación solar incidente (Figura 10). Esto puede ser debido a las diferencias en transmisividad registradas en las dos estructuras (65 y 53 % en K2 y F1 respectivamente). Los valores de radiación exterior, fueron muy variables entre los días dependiendo de la nubosidad. Durante el primer ciclo se observa una disminución de la radiación a lo largo del ciclo debido a que los días se van acortando hasta el solsticio de invierno. La radiación incidente se comenzó a medir luego del trasplante al sistema NFT.

Durante el primer ciclo medido (otoño), la radiación incidente acumulada por el cultivo de lechuga fue de $257,4 \text{ MJ m}^{-2}$ en 41 días mientras que el cultivo de rúcula tuvo una radiación acumulada de $182,3 \text{ MJ m}^{-2}$ en 21 días (anexo 3). La radiación promedio diaria en el interior de los invernaderos para el primer ciclo de rúcula fue de $9,2 \text{ MJ m}^{-2}$ y la de lechuga $6,3 \text{ MJ m}^{-2}$.

La radiación diaria acumulada durante el segundo ciclo (verano) fue de $375,5 \text{ MJ m}^{-2}$ en 27 días para el cultivo de lechuga y de $361,2 \text{ MJ m}^{-2}$ en 21 días para el cultivo de rúcula (anexo 4). A pesar de que el ciclo de cultivo de la rúcula es más corto, al encontrarse en el invernadero K2 donde la transmisividad fue mayor, la radiación que recibió fue cercana al cultivo de lechuga. La radiación promedio diaria en el interior de los invernaderos para el segundo ciclo de rúcula fue de $17,2 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ y la de lechuga $13,8 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$.

A)



B)

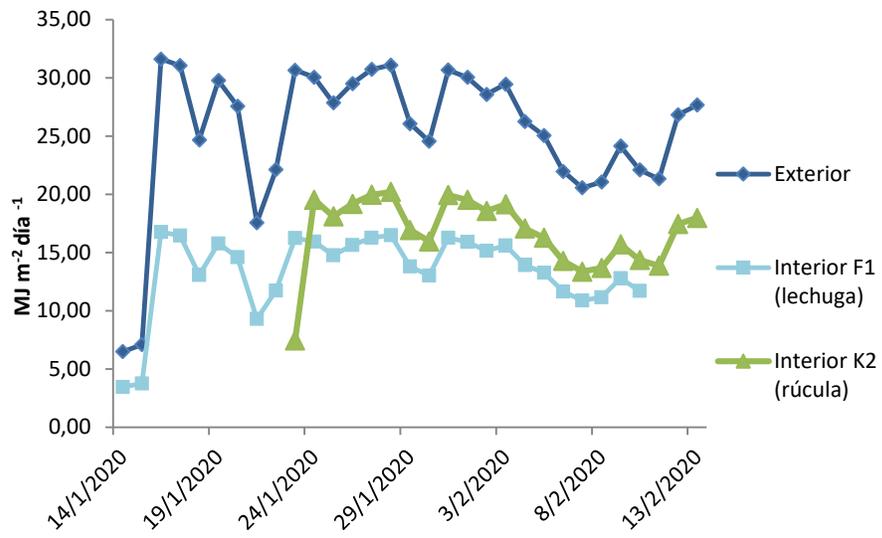


Figura 10. Radiación solar diaria acumulada incidente en el exterior y el interior de los invernaderos en los cultivos del ciclo 1 (A) y del ciclo 2 (B).

4.1.2. Temperatura ambiente y humedad relativa

En el cuadro 10 se puede apreciar que en el ciclo 2 (verano), la temperatura fue más alta y la humedad relativa fue más baja comparada con el ciclo 1 (otoño). En el ciclo 2, se alcanzaron temperaturas máximas mayores a 40 °C y humedades mínimas de 29 % (anexo 6).

En el ciclo 1, se puede observar que la humedad relativa tiende a aumentar y que la temperatura tiende a descender hacia el final del ciclo. En cuanto a la humedad relativa, se puede apreciar que durante todas las noches del ciclo llegó a valores superiores a 100 % (anexo 5).

Cuadro 10. Temperatura ambiente y humedad relativa medida dentro de los invernaderos para ambos ciclos.

VARIABLES EVALUADAS	Lechuga		Rúcula	
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 1	Ciclo 2
Temperatura ambiente mínima (°C)	6,1	10,5	7,5	10,6
Temperatura ambiente promedio (°C)	18,1	25,5	18,6	24,7
Temperatura ambiente máxima (°C)	33,1	41,5	34,6	37,6
D.E.* temperatura ambiente (°C)	5,6	6,9	6,0	6,1
Humedad relativa mínima (%)	41,5	28,7	37,8	28,9
Humedad relativa promedio (%)	95,2	75,2	86,8	78,5
Humedad relativa máxima (%)	115,4	107,0	105,9	109,4
D.E.* de humedad relativa (%)	22,0	23,3	19,0	22,5

*D.E.: Desvío Estándar.

4.2. MANEJO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA

En el cuadro 11 se puede apreciar que las temperaturas registradas en la solución nutritiva se encontraron entre 18 y 33 °C respectivamente para los ciclos 1 y 2. Se observó una diferencia marcada en la temperatura entre ciclos. El ciclo 2 presentó temperaturas promedio más elevadas que el ciclo 1 para ambos cultivos.

Los valores promedio de pH registrados estuvieron entre 6,3 y 6,8. Las oscilaciones en el pH de la solución del cultivo de lechuga fueron mayores en el ciclo 1 que en el ciclo 2. En cambio, en la rúcula la variación en el pH fue más grande en ciclo 2 que en el 1. Para ambos cultivos, en el ciclo 2 se manejaron niveles más altos de CE que el ciclo 1 debido a decisiones de la empresa. En el primer ciclo, la CE promedio fue de 1,38 mS cm⁻¹ mientras que en el segundo ciclo fue de 1,73 mS cm⁻¹.

Cuadro 11. Temperatura, pH y conductividad promedio de la solución para ambos ciclos de cultivo en lechuga y rúcula.

Variables evaluadas	Lechuga		Rúcula	
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 1	Ciclo 2
Temperatura de solución mínima (°C)	17,9	22,5	19,4	19
Temperatura de solución promedio (°C)	22,8	27,9	24,2	26,92
Temperatura de solución máxima (°C)	29,3	33,3	29	31,6
D.E. temperatura de solución (°C)	2,86	3,21	2,51	3,42
pH mínimo	6,1	5,95	6,7	5,6
pH promedio	6,63	6,39	6,8	6,28
pH máximo	7,2	6,72	7	6,6
D.E. pH	0,26	0,15	0,09	0,19
CE mínima (mS cm ⁻¹)	1,14	1,43	1,22	1,53
CE promedio (mS cm ⁻¹)	1,38	1,74	1,38	1,72
CE máxima (mS cm ⁻¹)	1,53	2	1,47	1,89
D.E. CE*	0,08	0,11	0,04	0,09
Número de muestras analizadas	136	70	48	48

(*) D.E.: Desviación Estándar. CE: Conductividad Eléctrica.

4.2.1. Cultivo de lechuga

En la figura 11 se puede apreciar que las temperaturas medias diarias de la solución nutritiva fueron mayores en el ciclo 2 (verano) que en el ciclo 1 (otoño) además de las oscilaciones diarias. Principalmente durante los primeros 15 días del ciclo se produjeron las mayores diferencias del pH de la solución entre ciclos. En la lechuga del primer ciclo durante la primera quincena se mantuvieron valores entre 6,5 y 7,0. Luego se bajó el pH promedio de la solución con valores promedio más próximos a 6,0, no superando valores de 6,7.

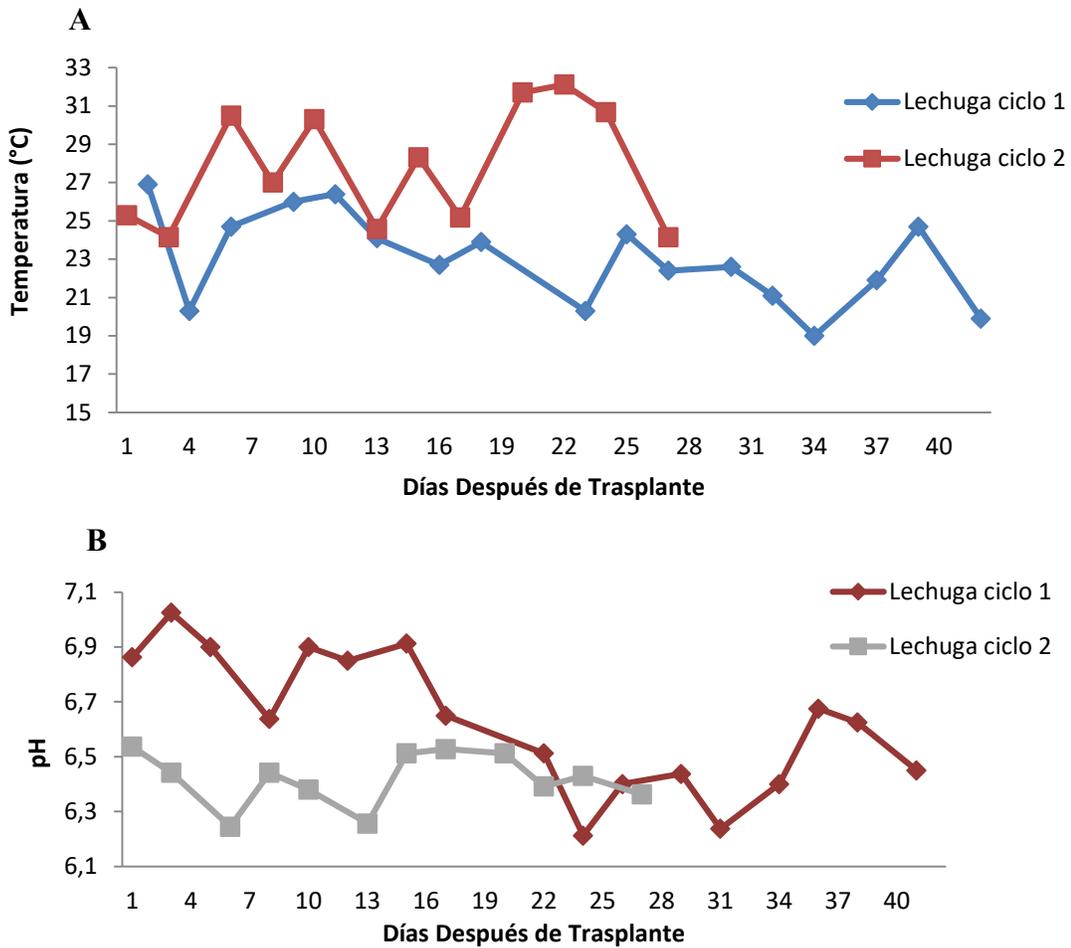


Figura 11. (A) Temperatura media diaria en la solución nutritiva de lechuga según ciclo. (B) pH diario de la solución nutritiva de lechuga según ciclo.

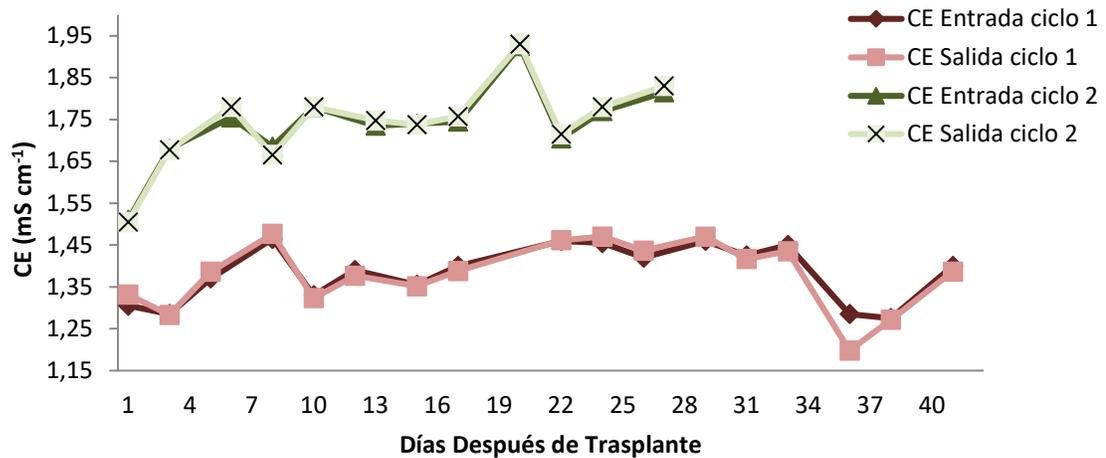


Figura 12. Conductividad eléctrica promedio diaria (mS cm^{-1}) de la solución nutritiva a la entrada y a la salida del sistema en lechuga según ciclo.

La figura 12 muestra que la conductividad eléctrica medida en la entrada y en la salida de los sectores es bastante similar. Además, se pueden ver conductividades mayores en el ciclo 2 (verano) que en el ciclo 1 (otoño) que se explican por una diferencia intencional en el manejo (en el primer ciclo se busca trabajar con una conductividad de $1,4 \text{ mS cm}^{-1}$ y en el segundo ciclo $1,8 \text{ mS cm}^{-1}$). Las muestras se tomaron antes de la corrección y recarga de los tanques, esto nos indica que los valores de conductividad muestreados deberían estar cerca de los valores mínimos que tuvo la solución durante todo su ciclo.

4.2.2. Cultivo de rúcula

En la figura 13 se observa que hasta el día 10 después del trasplante las temperaturas medias diarias de la solución nutritiva son similares en ambos ciclos. Luego las temperaturas del ciclo 2 (verano) son mayores que las del ciclo 1 (otoño), alcanzando valores de $30 \text{ }^\circ\text{C}$. El pH en el cultivo de rúcula fue mayor en el ciclo 1 respecto al ciclo 2, al igual que en la lechuga. En el primer ciclo los promedios diarios superaron 6,7 mientras que en el ciclo 2 se mantuvo entre 6,0 y 6,5 (figura 13).

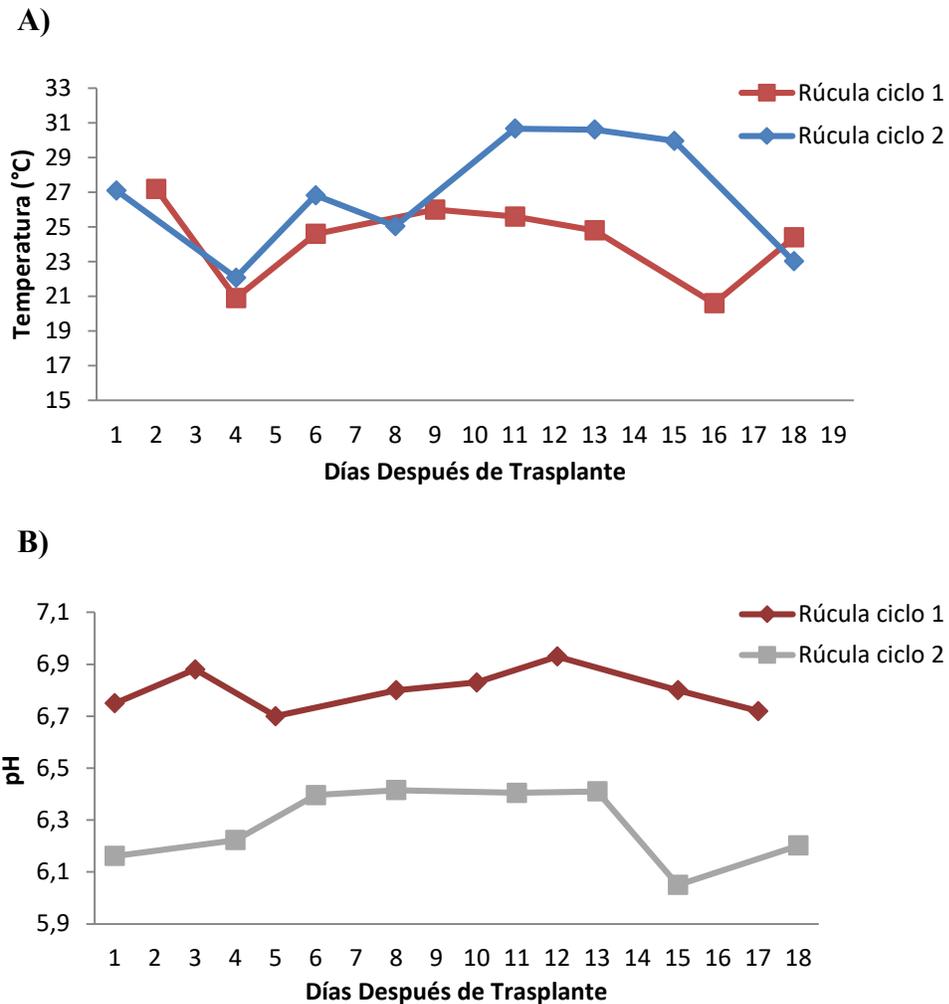


Figura 13. (A) Temperatura promedio diaria de la solución nutritiva de la rúcula según ciclo. (B) pH diario de la solución nutritiva de rúcula según ciclo.

En la figura 14 se representa la conductividad promedio de entradas y salidas de ambos ciclos del cultivo de rúcula. Se puede observar que la conductividad registrada en el ciclo 2 fue mayor que la medida en el ciclo 1. Además, analizando la diferencia entre la conductividad de entrada y salida en un mismo ciclo, se puede observar que durante todo el ciclo 1, la conductividad de entrada fue menor o igual a la conductividad registrada en la salida de los sectores. En cambio, en el ciclo 2, la conductividad presentó valores similares en entrada y salida.

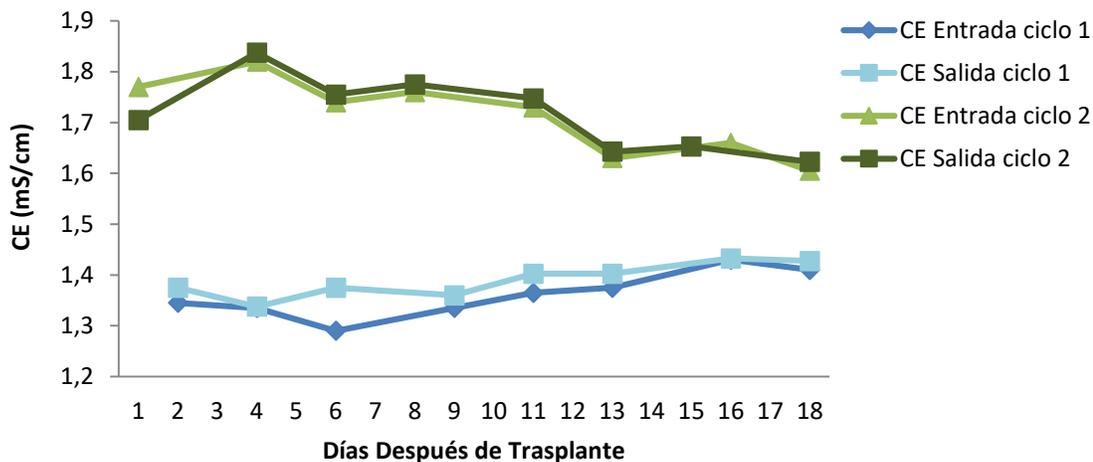


Figura 14. Conductividad eléctrica promedio diaria (mS cm^{-1}) de la solución nutritiva a la entrada y a la salida del sistema en rúcula según ciclo.

4.3. EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE NUTRIENTES

4.3.1. Concentración de nutrientes en la solución nutritiva

4.3.1.1. Primer ciclo

En el cuadro 12 se pueden observar los valores de nutrientes medidos en la solución nutritiva usada en ambos cultivos durante el primer ciclo. La solución nutritiva presentó una mayor concentración de NO_3^- en comparación con el K^+ para ambos cultivos. La relación NO_3^-/K^+ fue de 8,9 y 11,3 para lechuga y rúcula respectivamente.

4.3.1.2. Segundo ciclo

En el segundo ciclo, se registró un aumento de la concentración de NO_3^- y K^+ con respecto al ciclo 1 (cuadro 13). La concentración de NO_3^- fue mayor que la de K^+ pero con relaciones NO_3^-/K^+ más bajas que el ciclo 1, 4,5 en lechuga y 7,1 en rúcula. Además, se observó una alta concentración de Ca^{2+} , con una relación $\text{K}^+/\text{Ca}^{2+}$ de 0,1 en ambos cultivos. El Na^+ también mostró concentraciones promedio elevadas, especialmente en rúcula.

Cuadro 12. Concentraciones de potasio y nitrato en la solución nutritiva del primer ciclo (otoño) de lechuga y rúcula.

Nutrientes	n ¹	Media	D.E. ²	Mínimo	Máximo
<i>Lechuga</i>					
K^+ (mmol L ⁻¹)	48	0,13	0,17	0,00	0,59
NO_3^- (mmol L ⁻¹)	48	1,15	0,59	0,34	2,42
<i>Rúcula</i>					
K^+ (mmol L ⁻¹)	18	0,15	0,23	0,00	0,61
NO_3^- (mmol L ⁻¹)	18	1,7	0,8	0,8	3,5

¹ n: tamaño de muestra

² D.E.: Desvío Estándar

Cuadro 13. Concentraciones de potasio, nitrato, calcio y sodio en solución nutritiva del segundo ciclo (verano) de lechuga y rúcula.

Nutrientes	n ¹	Media	D.E. ²	Mínimo	Máximo
<i>Lechuga</i>					
K^+ (mmol L ⁻¹)	24	0,9	1,2	0,0	3,3
NO_3^- (mmol L ⁻¹)	24	4,1	1,8	1,5	7,7
Ca^{2+} (mmol L ⁻¹)	24	6,6	0,8	5,2	8,0
Na^+ (mmol L ⁻¹)	24	3,8	0,5	3,1	4,8
<i>Rúcula</i>					
K^+ (mmol L ⁻¹)	18	0,7	0,7	0,2	2,4
NO_3^- (mmol L ⁻¹)	18	5,0	2,1	2,4	9,4
Ca^{2+} (mmol L ⁻¹)	18	6,1	0,6	5,2	7,2
Na^+ (mmol L ⁻¹)	18	5,5	0,6	4,2	6,5

¹ n: tamaño de muestra

² D.E.: Desvío Estándar

4.3.2. Consumo de nutrientes por el cultivo de lechuga

4.3.2.1. Consumo de potasio

En la mayoría de los momentos de muestreo se observaron mayores concentraciones de potasio en la entrada del sector que en la salida, lo que refleja el consumo de K^+ por parte de las plantas (cuadro 14). También se registró una menor concentración de potasio en la tarde en comparación con las mediciones realizadas en la mañana, para la mayoría de los momentos de muestreo. El aumento de la concentración de potasio en el día 10 en el ciclo 2, responde al recambio de la solución nutritiva.

Cuadro 14. Concentración de K^+ (mmol L^{-1}) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de lechuga según ciclo.

Momento de muestreo	Ciclo 1				Ciclo 2			
	DDT ¹	K^+ entrada (mmol L^{-1})	K^+ salida ³ (mmol L^{-1})	ΔK^+ ⁴	DDT ₁	K^+ entrada (mmol L^{-1})	K^+ salida ³ (mmol L^{-1})	ΔK^+ ⁴
Mañana	3	0,00	0,00	0,00	3	0,46	0,38	0,08
Tarde		0,15	0,16	-0,01		0,54	0,51	0,03
Mañana	10	0,59	0,57	0,02	10	3,07	3,07	0,00
Tarde		0,38	0,00	0,38		2,38	2,67	-0,29
Mañana	17	0,20	0,07	0,14	17	0,00	0,00	0,00
Tarde		0,00	0,00	0,00		0,28	0,18	0,10
Mañana	24	0,28	0,22	0,06	24	0,49	0,35	0,14
Tarde		0,00	0,00	0,00		0,15	0,05	0,10
Mañana	31	0,33	0,17	0,16				
Tarde		0,00	0,00	0,00				
Mañana	38	0,26	0,10	0,15				
Tarde		0,00	0,00	0,00				

¹ DDT: Días después del trasplante.

² __ Recambio de la solución nutritiva.

³ Salidas: promedio de valores de tres muestras en el ciclo 1 y de dos muestras en el ciclo 2.

⁴ ΔK^+ : Entrada K^+ – Salida K^+ .

4.3.2.2. Consumo de nitrato

En el cuadro 15 se puede observar la concentración de nitrato durante ambos ciclos del cultivo de lechuga. En la mayoría de las mediciones los valores de entrada fueron mayores que en la salida, pero también hay muestras donde se da lo contrario. En cuanto a la concentración de nitrato del segundo ciclo se puede ver que alcanza valores bastante más altos que en el ciclo 1, principalmente el día 10 que coincide con el día en que se recambió la solución nutritiva. De todas formas, se puede apreciar que la concentración de nitratos baja rápidamente. Se observó un descenso del NO_3^- en la solución de la tarde comparada con la medida en la mañana.

Cuadro 15. Concentración de NO_3^- (mmol L^{-1}) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de lechuga según ciclo.

Momento de muestreo	Ciclo 1				Ciclo 2			
	DDT ¹	NO_3^- entrada (mmol L^{-1})	NO_3^- salida (mmol L^{-1})	ΔNO_3^- ₄	DDT ¹	NO_3^- entrada (mmol L^{-1})	NO_3^- salida (mmol L^{-1})	ΔNO_3^- ₄
Mañana	3	0,89	0,89	0,00	3	2,42	2,82	-0,40
Tarde		2,26	2,31	-0,05		3,39	3,23	0,16
Mañana	10	2,10	2,31	-0,22	10	7,58	7,34	0,24
Tarde		0,89	0,67	0,22		6,29	5,73	0,56
Mañana	17	1,24	1,45	-0,20	17	2,58	1,87	0,71
Tarde		1,21	0,92	0,29		2,90	2,82	0,08
Mañana	24	1,31	1,26	0,04	24	5,32	3,95	1,37
Tarde		0,68	0,72	-0,04		3,06	4,52	-1,45
Mañana	31	1,13	1,09	0,04				
Tarde		0,61	0,51	0,11				
Mañana	38	1,48	0,86	0,62				
Tarde		0,79	0,52	0,27				

¹ DDT: Días después de trasplante.

²—Recambio de la solución nutritiva.

³ Salidas: promedio de valores de tres muestras en el ciclo 1 y de dos muestras en el ciclo 2.

⁴ ΔNO_3^- : Entradas NO_3^- – Salidas NO_3^- .

4.3.2.3. Consumo de calcio

En el cuadro 16 se detalla la concentración de calcio medida en el ciclo 2 del cultivo de lechuga, donde se puede apreciar que la mayoría de los valores de entrada son menores a los de salida y que la concentración de las muestras tomadas en la mañana son menores que la concentración de las muestras tomadas en la tarde. Además, se puede observar que la concentración de calcio aumenta con el correr de los días desde el día en que se preparó la solución inicial hasta el día en que se recambia.

A diferencia de lo que se observa con las concentraciones de potasio y nitrato, los valores de calcio se encuentran dentro de un rango más estable. La diferencia entre el valor máximo y el mínimo no es tan grande como en los nutrientes anteriores.

Cuadro 16. Concentración de Ca^{2+} (mmol L^{-1}) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de lechuga.

Momento de muestreo	Ciclo 2			
	DDT ¹	Ca^{2+} entrada (mmol L^{-1})	Ca^{2+} salida (mmol L^{-1})	ΔCa^{2+} ⁴
Mañana	3	5,99	6,24	-0,25
Tarde		6,74	6,49	0,25
Mañana	10	5,24	5,36	-0,12
Tarde		5,74	6,24	-0,50
Mañana	17	7,98	7,73	0,25
Tarde		7,24	7,24	0,00
Mañana	24	6,49	6,61	-0,12
Tarde		6,99	7,11	-0,12

¹DDT: Días después de trasplante.

² __ Recambio de la solución nutritiva.

³ Salidas: promedio de valores de tres muestras en el ciclo 1 y de dos muestras en el ciclo 2.

⁴ ΔCa^{2+} : Entradas Ca^{2+} – Salidas Ca^{2+} .

4.3.2.4. Consumo de sodio

Como se puede apreciar en el cuadro 17 la concentración de sodio se encuentra en torno a los 3-4 mmol L⁻¹. Si se observa la última columna del cuadro, ΔNa^+ , se puede apreciar que en la mayoría de los muestreos la concentración de entrada fue menor que la concentración en la salida. Pero con el correr de los días desde la preparación de la solución la concentración fue aumentando, acumulándose el Na⁺ en la solución nutritiva.

Cuadro 17. Concentración de Na⁺ (mmol L⁻¹) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de lechuga.

Momento de muestreo	Ciclo 2			
	DDT ¹	Na ⁺ entrada (mmol L ⁻¹)	Na ⁺ salida (mmol L ⁻¹)	ΔNa^+ ⁴
Mañana	3	3,18	3,18	0,00
Tarde		3,48	3,33	0,15
Mañana	10	3,61	3,11	0,50
Tarde		3,35	3,35	0,00
Mañana	17	4,78	4,35	0,43
Tarde		4,35	4,31	0,04
Mañana	24	4,05	4,02	0,02
Tarde		4,26	4,28	-0,02

¹DDT: Días después de trasplante.

² Recambio de la solución nutritiva.

³ Salidas: promedio de valores de tres muestras en el ciclo 1 y de dos muestras en el ciclo 2.

⁴ ΔNa^+ : Entradas Na⁺ – Salida Na⁺.

4.3.3. Cultivo de rúcula

4.3.3.1. Consumo de potasio

En el caso de la rúcula, al igual que en lechuga, si se compara las concentraciones de potasio en entradas y salidas de un mismo muestreo son más altas en las entradas, a excepción de los casos donde la concentración a la entrada fue 0 (cuadro 18). Este catión se registra en cantidades muy bajas durante todo el ciclo de cultivo. En el ciclo 1, se puede ver que los muestreos realizados durante la tarde siempre dieron ausencia de potasio o concentraciones despreciables para el medidor.

Cuadro 18. Concentración de K^+ ($mmol L^{-1}$) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de rúcula según ciclo.

Momento de muestreo	Ciclo 1				Ciclo 2			
	DDT ¹	K^+ entrada ($mmol L^{-1}$)	K^+ salida ($mmol L^{-1}$)	ΔK^+ ⁴	DDT ¹	K^+ entrada ($mmol L^{-1}$)	K^+ salida ($mmol L^{-1}$)	ΔK^+ ⁴
Mañana	3	0,36	0,33	0,03	1	0,61	0,60	0,01
Tarde		0,00	0,00	0,00		2,43	2,07	0,36
Mañana	10	0,61	0,56	0,05	8	0,46	0,42	0,04
Tarde		0,00	0,00	0,00		0,31	0,24	0,06
Mañana	17	0,00	0,00	0,00	15	0,38	0,28	0,10
Tarde		0,00	0,00	0,00		0,33	0,29	0,04

¹DDT: Días después de trasplante.

²__ Recambio de solución nutritiva.

³Promedio de salidas: promedio de valores de 2 muestras para ambos ciclos.

⁴ ΔK^+ : Entrada K^+ – Salida K^+ .

4.3.3.2. Consumo de nitrato

En el cuadro 19 se puede observar que en el primer ciclo se registró la máxima concentración de nitrato en el día 10, resultado que se debe al recambio de solución que se realizó el día 4. En el segundo ciclo, las concentraciones de nitratos encontradas fueron mayores en todos los muestreos en relación al primer ciclo.

Cuadro 19. Concentración de NO_3^- (mmol L^{-1}) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de rúcula según ciclo.

Momento de muestreo	Ciclo 1				Ciclo 2			
	DDT ¹	NO_3^- entrada (mmol L^{-1})	NO_3^- salida (mmol L^{-1})	ΔNO_3^- ₄	DDT ¹	NO_3^- entrada (mmol L^{-1})	NO_3^- salida (mmol L^{-1})	ΔNO_3^- ₄
Mañana	3	1,53	1,69	-0,16	1	4,84	6,37	-1,53
Tarde		1,24	1,24	0,00		7,90	9,19	-1,29
Mañana	10	3,06	3,31	-0,24	8	4,03	3,87	0,16
Tarde		1,94	1,94	0,00		5,65	3,71	1,94
Mañana	17	1,00	0,88	0,12	15	3,87	3,87	0,00
Tarde		0,82	1,03	-0,21		4,19	2,50	1,69

¹ DDT: Días después de trasplante.

² Recambio de la solución nutritiva.

³ Promedio de salidas: promedio de valores de dos muestras para ambos ciclos.

⁴ ΔNO_3^- : Entradas NO_3^- – Salidas NO_3^- .

4.3.3.3. Consumo de calcio

En el cultivo de rúcula se puede observar la misma tendencia que en la lechuga en el consumo aparente de calcio (cuadro 20). Con el correr de los días las concentración de calcio va aumentando, como se puede apreciar en la última columna (ΔCa^{2+}), donde muchos de los valores son negativos (el Ca^{2+} tiende a concentrarse en la solución nutritiva).

Cuadro 20. Concentración de Ca^{2+} (mmol L^{-1}) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de rúcula.

Momento de muestreo	Ciclo 2			
	DDT	Ca^{2+} entrada (mmol L^{-1})	Ca^{2+} salida (mmol L^{-1})	ΔCa^{2+} ⁴
Mañana	1	5,74	5,86	-0,12
Tarde		6,24	6,11	0,12
Mañana	8	6,74	7,11	-0,37
Tarde		6,74	6,61	0,12
Mañana	15	5,24	5,49	-0,25
Tarde		5,49	5,86	-0,37

¹ DDT: Días después del trasplante.

² — Recambio de la solución nutritiva.

³ Promedio de salidas: promedio de valores de dos muestras para ambos ciclos.

⁴ ΔCa^{2+} : Entradas Ca^{2+} – salidas Ca^{2+} .

4.3.3.4. Consumo de sodio

En el cultivo de rúcula se observó que la concentración de sodio fue mayor que en la solución que alimenta a los cultivos de lechuga llegando a valores muy altos (cuadro 21). Los valores en la solución de salida fueron iguales o mayores a la solución nutritiva a la entrada al cultivo.

Cuadro 21. Concentración de Na^+ (mmol L^{-1}) en la solución nutritiva de entrada y salida en el cultivo de rúcula.

<i>Momento de muestreo</i>	Ciclo 2			
	<i>DDT</i>	Na^+ entrada (mmol L^{-1})	Na^+ salida (mmol L^{-1})	ΔNa^{+4}
Mañana	1	4,78	4,78	0,00
Tarde		4,22	4,78	-0,57
Mañana	8	6,09	5,44	0,65
Tarde		6,09	6,09	0,00
Mañana	15	5,65	6,09	-0,43
Tarde		5,65	5,65	0,00

¹ DDT: Días después del trasplante.

²— Recambio de la solución nutritiva.

³ Promedio de salidas: promedio de valores de dos muestras para ambos ciclos.

⁴ ΔNa^{+4} : Entradas Na^+ – salidas Na^+ .

4.4. EVALUACIÓN DE CRECIMIENTO

4.4.1. Cultivo de lechuga

La figura 15 muestra cómo fue el crecimiento y desarrollo de las lechugas estudiadas en ambos ciclos. Se puede apreciar cómo se va formando una de las características principales de este tipo de lechuga “Salanova”, que es una gran cantidad de hojas de tamaño pequeño. Se encontró una diferencia marcada entre la duración del ciclo 1 y del ciclo 2 a la cosecha (42 y 28 días después de trasplante). El segundo ciclo transcurrió más rápido, alcanzándose igual peso seco y fresco en menor tiempo. En la figura 16 y anexo 1 se muestra la evolución del peso seco y fresco respectivamente, del cultivo de lechuga de los dos ciclos muestreados.



Figura 15. Fases de crecimiento y desarrollo del cultivo de lechuga (DDT: Días después de trasplante).

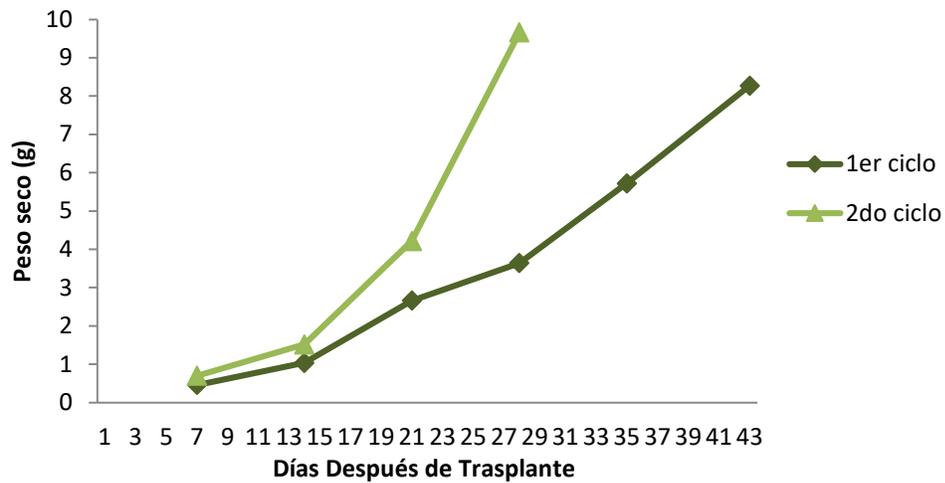


Figura 16. Peso seco promedio por planta del cultivo de lechuga.

El cuadro 22 nos indica el peso fresco y seco promedio acumulado cada 7 días y el porcentaje de ganancia de peso fresco y seco en cada semana desde el trasplante. El valor es un promedio de 5 plantas muestreadas por día. Se observaron tasas de acumulación de materia seca muy diferentes de acuerdo con el ciclo especialmente desde la cuarta semana en adelante.

Cuadro 22. Tasa de crecimiento semanal en peso fresco y seco del cultivo de lechuga.

1 ^{er} Ciclo				2 ^{do} Ciclo					
Días después del trasplante	Peso fresco		Peso seco		Días después del trasplante	Peso fresco		Peso seco	
	g/sem	%	g/sem	%		g/sem	%	g/sem	%
7	6,1	3	0,5	6	7	9,4	5	0,7	7
14	10,7	5	0,6	7	14	13,3	7	0,8	8
21	45,7	22	1,6	20	21	49,9	26	2,7	28
28	36,0	17	1,0	12	28	116,1	62	5,4	56
35	27,8	13	2,1	25	Acumulado	188,7	100	9,7	100
43	80,6	39	2,6	31					
Acumulado	206,9	100	8,3	100					

Ambos ciclos de lechuga acumularon entre el 30 y el 40 % de la materia fresca y seca en las primeras tres semanas. Luego, se observaron diferencias marcadas entre los

ciclos. En el primer ciclo, sembrado en marzo, el 70 % de la materia seca y fresca se acumuló en 3 semanas, mientras que, en el segundo ciclo plantado en enero, se acumuló un 60 % de la materia seca y fresca en tan solo una semana. El segundo ciclo se cosechó con un peso fresco final menor (188.7 g) que el primer ciclo (206.9 g).

4.4.2. Cultivo de rúcula

En la figura 17 y anexo 2 se puede apreciar el crecimiento del cultivo de rúcula en los dos ciclos evaluados. En el caso de la rúcula, las muestras estuvieron compuestas por un conjunto de plantas, ya que se siembran varias semillas por casilla. Si comparamos las fotos de la primera semana después del trasplante, se puede ver que el tamaño de planta en el ciclo 2 (verano) fue mayor que el ciclo 1 (otoñal). Esto se debe a que las plantas al trasplante en el ciclo 1 tenían 7 días y en el ciclo 2 tenían 12 días desde la siembra. Es decir, en el ciclo estival se plantó un plantín más desarrollado.

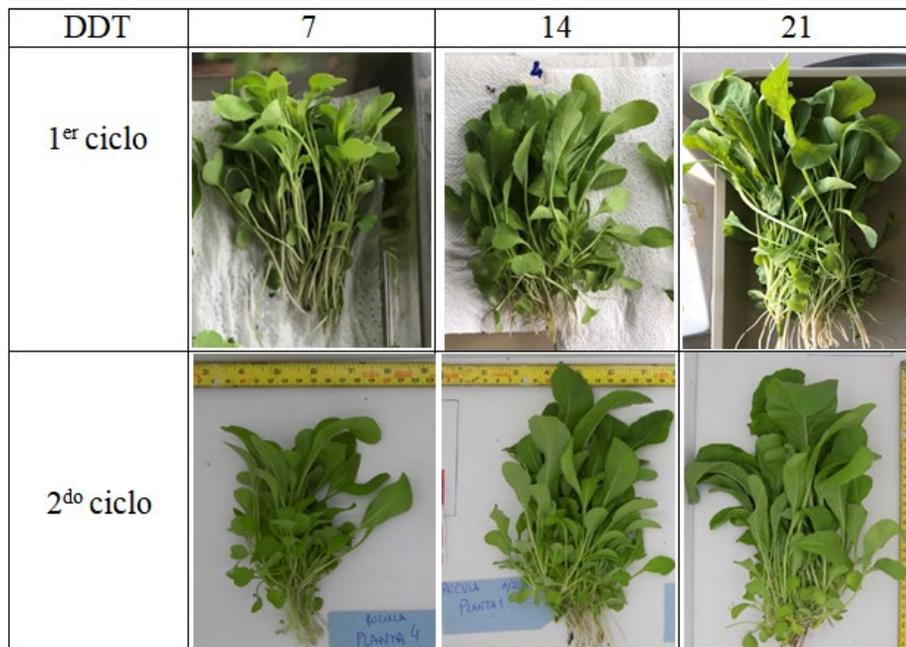


Figura 17. Fases de crecimiento y desarrollo del cultivo de rúcula en el ciclo 1 y en el ciclo 2 (DDT: Días después de trasplante).

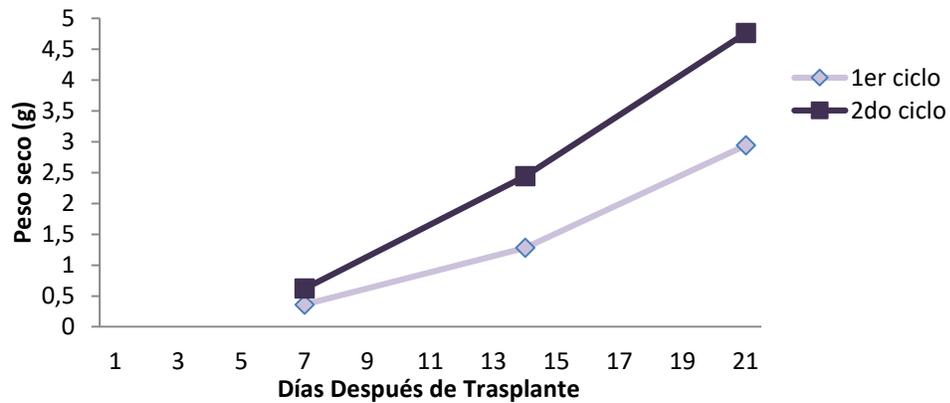


Figura 18. Peso seco promedio por planta del cultivo de rúcula.

En el cuadro 23 y figura 18 se observa que el ciclo 2 acumuló más materia seca y fresca en el mismo período logrando un peso a cosecha mayor (45,6 y 55,4 g para el ciclo 1 y 2 respectivamente). La ganancia de peso semanal en el ciclo 1 (otoñal) se acumuló en la última semana mientras que en ciclo 2 (estival) el crecimiento fue mayor en las últimas dos semanas.

Cuadro 23. Tasa de crecimiento semanal en peso fresco y seco del cultivo de rúcula según ciclo.

Días después del trasplante	1 ^{er} Ciclo				2 ^{do} Ciclo			
	Peso fresco		Peso seco		Peso fresco		Peso seco	
	g/sem	%	g/sem	%	g/sem	%	g/sem	%
7	6,4	14	0,4	12	9,1	16	0,6	13
14	11,4	25	0,9	31	22,2	40	1,8	38
21	27,9	61	1,7	56	24,1	43	2,3	49
Promedio:	15,2		1		18,5		1,6	

4.5. ANÁLISIS FOLIAR

En el cuadro 24 se muestran las concentraciones de nitrógeno y potasio para ambos ciclos de lechuga. En ambos nutrientes la concentración inicial fue la más baja, luego tiende a aumentar y en el último tramo del ciclo tiende a estabilizarse o bajar. En el caso del porcentaje de N, el máximo de concentración en hojas de lechuga se produjo antes que el máximo de concentración de potasio en ambos ciclos. Además, en el ciclo 2 (verano) el porcentaje máximo de N ocurrió a los 14 ddt alcanzando un valor de 4,1 % mientras que en el ciclo 1 (otoñal) el máximo ocurrió a los 21 ddt alcanzando un valor de 5.2 % de N. El % de K osciló entre 3,2 y 4,8 % en el ciclo 1, alcanzando valores inferiores a los observados para el ciclo 2 (entre 3,8 y 5,7 %).

Cuadro 24. Concentración semanal de nitrógeno y potasio en hojas de lechuga según ciclo.

LECHUGA CICLO 1			LECHUGA CICLO 2		
DDT	N	K	DDT	N	K
	%			%	
7	3.5	3.18	7	2.98	3.84
14	4.24	3.60	14	4.11	4.85
21	5.17	4.48	21	3.74	5.77
28	4.87	4.79	28	3.68	5.44
35	4.8	4.49			

- DDT: Días después de trasplante.

Cuadro 25. Concentración semanal de nitrógeno y potasio en hojas de rúcula según ciclo.

RÚCULA CICLO 1			RÚCULA CICLO 2		
DDT	N	K	DDT	N	K
	%			%	
7	5.69	4.62	7	5.43	6.50
14	5.32	4.19	14	4.8	5.83
21	5.28	4.48	21	4.35	5.86

- DDT: Días después de trasplante.

En el cuadro 25 se puede apreciar que las concentraciones de nitrógeno y potasio iniciales en ambos ciclos del cultivo de rúcula fueron más altas, registrándose valores

menores luego de la primera semana. Los porcentajes de N medidos en hojas de rúcula fueron mayores que los observados en lechuga. En el porcentaje de K, los valores en hojas de rúcula fueron mayores en el ciclo 2 (entre 5,8 y 6,5 %) con respecto al ciclo 1 (entre 4,2 y 4,6 %).

4.5.1. Análisis de la absorción de nutrientes

4.5.1.1. Cultivo de lechuga

En la figura 19 se muestra la evolución de la absorción de nutrientes (nitrógeno y potasio) en ambos ciclos del cultivo de lechuga. El cálculo se realizó a partir del peso promedio de materia seca y el porcentaje de nutriente medido en planta entera. Para obtener el consumo de N y de K en una hectárea se estimó una densidad de plantación de 250.000 plantas ha⁻¹.

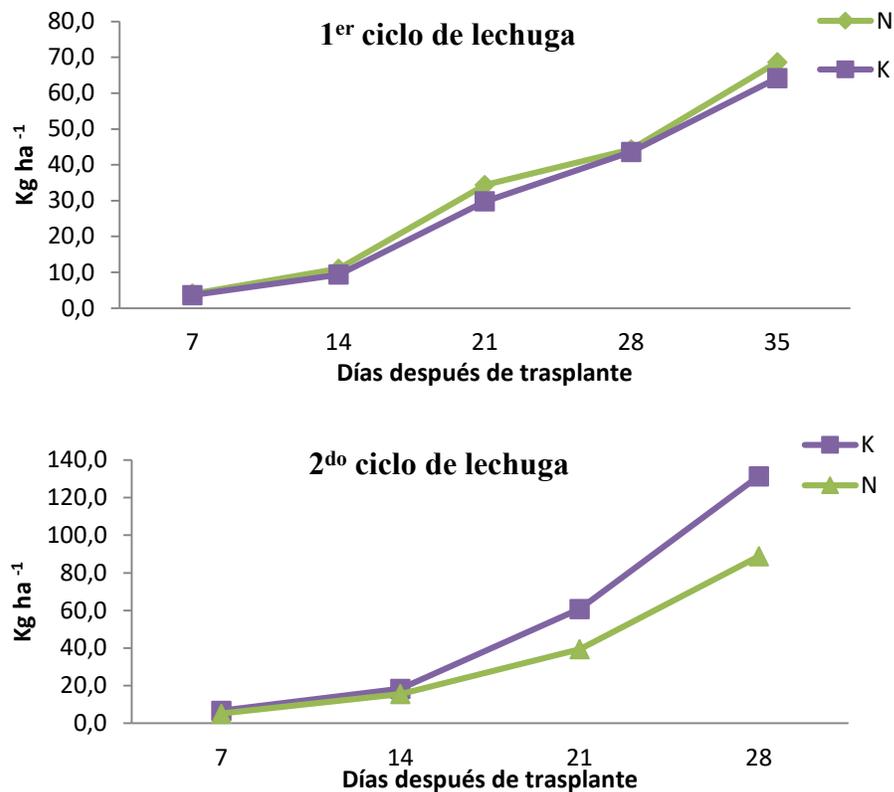


Figura 19. Absorción de nutrientes durante el ciclo 1 y 2 del cultivo de lechuga.

4.5.1.2. Cultivo de rúcula

En la figura 20 se muestra la evolución de la absorción de nutrientes (nitrógeno y potasio) en ambos ciclos del cultivo de rúcula. El cálculo se realizó de forma análoga al del cultivo de lechuga, pero se estimó una densidad de plantación de 395.650 plantas ha⁻¹.

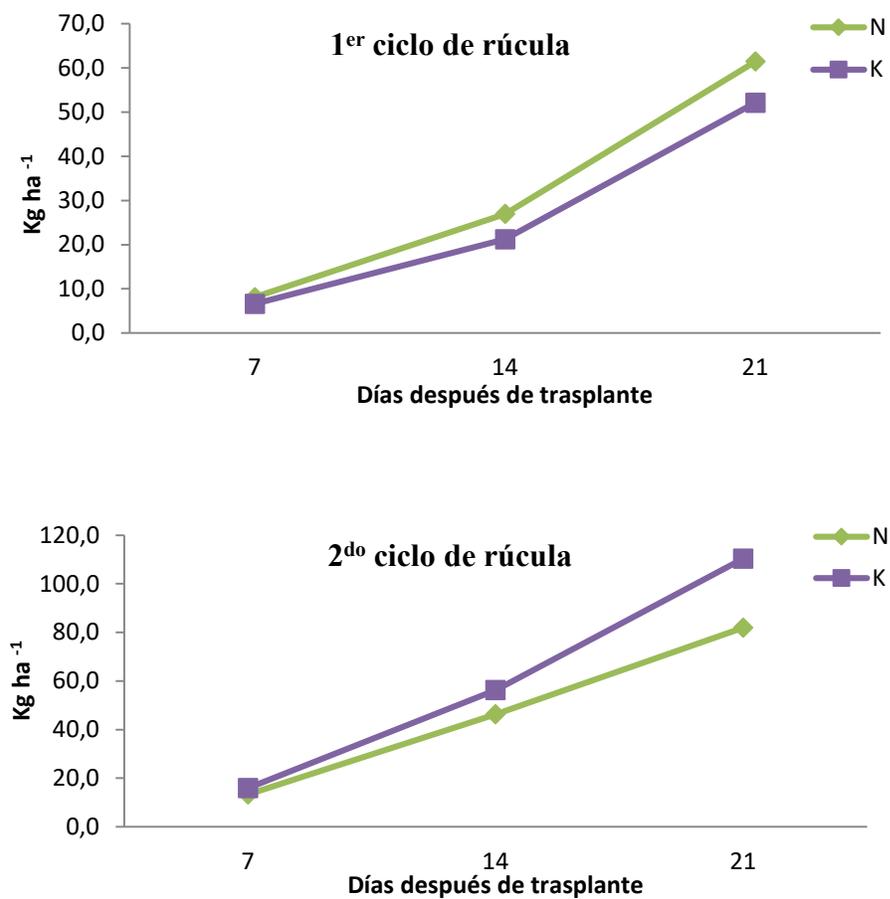


Figura 20. Absorción de nutrientes a lo largo del ciclo 1 y del ciclo 2 del cultivo de rúcula.

5. DISCUSIÓN

5.1. CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL CRECIMIENTO

En ambos ciclos de cultivo para lechuga y rúcula, se pudo observar una asociación negativa entre la temperatura y la humedad relativa. También se observó una asociación positiva entre la radiación solar y la temperatura. Esto concuerda con lo observado por Fallovo et al. (2009), que refiere que hay una correlación positiva entre radiación y temperatura ya que en invernaderos no climatizados estos factores climáticos están muy relacionados el uno al otro: a mayor radiación solar mayor será la temperatura del aire en el invernadero.

La mayor radiación solar recibida en el ciclo de verano a igual momento (DDT, días después de trasplante) se relacionó con un mayor rendimiento en peso para ambos cultivos. Según Fallovo et al. (2009), el mayor rendimiento comercial de la lechuga en el verano comparado con la primavera fue debida a las condiciones de radiación solar. La mayor radiación solar, resultante del mayor nivel de luz natural y del mayor fotoperiodo fue probablemente la responsable del incremento en la fotosíntesis en la estación de verano con respecto a la primavera.

La lechuga es especialmente sensible a la luz. La intensidad y duración de la luminosidad pueden llegar a ser factores limitantes desde mayo a agosto produciéndose un crecimiento lento y un aumento del período de acogollado (Barrera, 2020).

Según Galván y Rodríguez (2008), la lechuga como todas las especies tienen temperaturas cardinales en las cuales efectúa su crecimiento/desarrollo, siendo la temperatura óptima 16 a 20°C, temperatura mínima 6°C y la temperatura máxima 27°C, todas ellas sujetas a pequeñas variaciones en función del tipo varietal considerado. En el ensayo realizado, el promedio de temperaturas del ciclo medido en otoño estuvo dentro de los rangos óptimos para el cultivo, mientras que, en el ciclo medido en verano, la temperatura promedio fue superior a la óptima.

De acuerdo a Mattson y Merrill (2015), el porcentaje de humedad relativa para lechuga y otros cultivos de hoja en hidroponía debe situarse entre 50-70%. Los valores promedio obtenidos en el ensayo se sitúan por encima del rango óptimo, estando más cerca del mismo el ciclo 2 (estival) ya que los valores obtenidos en el ciclo 1 (otoñal) son en promedio bastante superiores.

En el caso de la rúcula, un estudio que tuvo como objetivo cuantificar los efectos de la intensidad de la luz sobre la calidad nutricional informó una correlación positiva entre la intensidad de la luz y el peso seco (Colonna et al., 2016).

Currey e Imbler (2020) refiere que las temperaturas del aire tienen una fuerte influencia en la tasa de crecimiento y desarrollo de la rúcula. La rúcula se ha considerado tradicionalmente un cultivo de temperaturas frescas (16,6 °C). Sin embargo, estudios realizados por Currey e Imbler (2020) demuestran que para la rúcula el cultivo a temperaturas más cálidas (23,8 °C) aumenta la tasa de crecimiento llegando a mayores rendimientos con ciclos más cortos. En el ensayo realizado, el promedio de temperaturas se encontró por debajo de lo recomendado durante el primer ciclo (18,6 °C) y más próximo a la temperatura óptima durante el segundo ciclo (24,7 °C).

5.2. MANEJO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA

5.2.1. pH, temperatura y conductividad eléctrica

El pH de la solución es importante porque controla la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Un pH de 5.8 se considera óptimo para la mayoría de las plantas, sin embargo, un rango de 5.6 a 6.0 es aceptable (Brechtner y Both, 2013). Para la lechuga, los valores de pH en la solución hidropónica deberán mantenerse entre 5,5-6 con un valor óptimo de 5,8 (Henry et al., 2018). Durante ambos ciclos de cultivo los valores de pH promedio (6,80 y 6,28 para rúcula y 6,63 y 6,39 para lechuga) fueron superiores a los recomendados por bibliografía para los dos cultivos muestreados. En el segundo ciclo de cultivo, a través del manejo de la solución nutritiva se buscó mantener un pH menor al del primer ciclo, pero de todas formas no se alcanzó al valor óptimo. Esto quiere decir que la dosis de ácido, utilizado para reducir el pH de la solución, no fue suficiente para lograr el pH deseado. La mayor parte de los nutrientes muestran su máxima disponibilidad dentro del intervalo de pH de 5,0 a 6,5, especialmente los micronutrientes (Urrestarazú, 2015) por lo que es posible que algunos nutrientes no estuviesen disponibles para las plantas afectando su crecimiento. El fósforo, hierro, manganeso, calcio y magnesio forman precipitados y pueden no estar disponibles arriba de pH 7 (Resh, 2001).

Los valores de temperatura deseables para la solución nutritiva tienen variaciones según diferentes autores. Para Shi (2019), la temperatura óptima en solución nutritiva para el cultivo de lechuga mantecosa en hidroponía está en 25°C, para Rusu et al. (2021) se debería mantener una temperatura debajo de 20°C de forma de mantener la

cantidad de oxígeno disuelto en el agua en parámetros óptimos (6 mg l^{-1}) y para Carotti et al. (2021) la temperatura más razonable para cultivo de lechuga en hidroponía es de 24°C tanto en el aire como en la solución. La temperatura promedio del primer ciclo (otoñal) se encontró dentro de los parámetros recomendados por algunos autores ya que estos valores estuvieron entorno a los $23\text{-}24^{\circ}\text{C}$. En cambio, en el segundo ciclo muestreado (estival) la temperatura promedio fue superior a lo deseable ya que valores de $27\text{-}28^{\circ}\text{C}$ pueden llevar a una menor oxigenación radicular, el mayor desarrollo de enfermedades y afectar el rendimiento de los cultivos. Temperaturas elevadas en la solución nutritiva, pueden perjudicar el desarrollo de la planta y la raíz y aumentar la incidencia de enfermedades y pestes (Chun y Takakura, 1994).

Según estudios de Samarakoon et al. (2019) en cultivares de lechuga Salanova@ (cultivares Manteca Verde, Manteca Roja) en NFT se observa un rendimiento máximo a una CE de $1,8 \text{ mS cm}^{-1}$. Para la rúcula (*Eruca sativa* Mill. "Standard") bajo un sistema de producción en NFT, Yang et al. (2021) señalaron que, en base al rendimiento, criterios de calidad y salud, el tratamiento óptimo de conductividad eléctrica es de $1,5$ a $1,8 \text{ dS m}^{-1}$. Menores o mayores electroconductividades reducen el rendimiento, la calidad visual, los compuestos fitoquímicos, resultan en un sabor y color menos atractivo al consumidor y aumentan los efectos negativos en la salud debido a la acumulación de nitratos. En el primer ciclo evaluado los valores promedio de CE se situaron en $1,38 \text{ mS cm}^{-1}$, valores por debajo de lo recomendado por la bibliografía para ambos cultivos. En el segundo ciclo se manejó una conductividad mayor que llevó a que los valores promedio estuvieran cercanos a $1,8 \text{ mS cm}^{-1}$ para ambos cultivos. Este valor se encuentra en el rango recomendado para el cultivo de lechuga y de rúcula. De todas formas el manejo de las soluciones nutritivas por el valor de electroconductividad sigue siendo pobre porque se pueden alcanzar los valores deseados de conductividad con un agua salina con un escaso aporte de nutrientes. De tal manera que la utilización de electrodos de actividad específica es un buen complemento para el manejo de la nutrición (Grasso et al., 2021).

5.2.2. Concentración de nutrientes

La concentración de nitrato objetivo con la receta utilizada para el primer ciclo era de $7,4 \text{ mmol l}^{-1}$ que se obtendría diluyendo la solución concentrada a una conductividad eléctrica de $1,4 \text{ mS cm}^{-1}$ y para el segundo ciclo $9,6 \text{ mmol l}^{-1}$ que se obtendría a una conductividad de $1,8 \text{ mS cm}^{-1}$. Las mediciones de nitrato evidenciaron una concentración media durante el primer ciclo de $1,15 \text{ mmol l}^{-1}$ para el cultivo de

lechuga y de $1,7 \text{ mmol l}^{-1}$ para el cultivo de rúcula. Para el segundo ciclo los valores promedio de nitrato obtenidos en el cultivo de lechuga fueron de $4,1 \text{ mmol l}^{-1}$ y 5 mmol l^{-1} para el cultivo de rúcula. Los valores de nitrato medidos se encuentran muy por debajo de los valores buscados y los recomendados: 10 mmol l^{-1} (Morgan, 1999) y 14 mmol l^{-1} (Furlani, 1998) para el óptimo crecimiento de las plantas.

Mattson y Merrill (2015) señalan la reducción de crecimiento de las plantas debido al déficit de nitrógeno, así como alteraciones en la coloración pudiendo llegar a manifestar clorosis principalmente en hojas viejas. La disponibilidad de nitrógeno es crítica e indispensable para un cultivo de hoja como la lechuga que se caracteriza por una gran sensibilidad a su deficiencia (Broadley et al., 2000).

En cuanto a la concentración de potasio, los valores buscados en la formulación para el primer ciclo eran de $3,2 \text{ mmol l}^{-1}$ y en el segundo ciclo de $4,3 \text{ mmol l}^{-1}$ para las conductividades correspondientes. Las concentraciones de potasio promedio detectadas en las muestras del primer ciclo fueron de $0,13 \text{ mmol l}^{-1}$ en el cultivo de lechuga y $0,15 \text{ mmol l}^{-1}$ en el cultivo de rúcula. En el segundo ciclo fueron de $0,9 \text{ mmol l}^{-1}$ y $0,7 \text{ mmol l}^{-1}$ en lechuga y rúcula respectivamente. Los valores promedio detectados estuvieron muy por debajo de las concentraciones buscadas aun con la solución recién colocada. Además, estas concentraciones se sitúan muy por debajo de las recomendadas en la bibliografía: $5,4 \text{ mmol l}^{-1}$ (Resh, 2001) y $6,6 \text{ mmol l}^{-1}$ (Rodríguez et al., 2001), llegando a valores no detectables por el instrumento de medición en varias oportunidades. El déficit de este nutriente se agudizó con el tiempo entre preparación de nuevas soluciones, ya que con el paso de los días la concentración fue decreciendo.

Las causas de las bajas concentraciones de nitrato y potasio pueden deberse a que se partía con una concentración inferior a la recomendada. Además, según Cloutier et al. (1997), la acumulación de iones menos consumidos conduce a un aumento de conductividad de la solución induciendo deficiencias y antagonismos de otros nutrientes más requeridos. Es común en hidroponía reponer los nutrientes manteniendo una determinada conductividad eléctrica en la solución, pero como se visualiza en el presente trabajo el ajuste sólo por la conductividad de la solución nutritiva es insuficiente. Algunos elementos no deseados y otros que se consumen lentamente, se acumulan aumentando la conductividad de la solución y enmascarando la baja concentración de los nutrientes más consumidos por el cultivo, llevando a la reducción de la concentración de nutrientes en los tejidos y a la consecuente reducción del crecimiento de las plantas (Miller et al., 2020).

Las concentraciones buscadas de calcio en la solución nutritiva fueron de 2,5 mmol l⁻¹ en el primer ciclo y 3,3 mmol l⁻¹ en el segundo ciclo en función de las conductividades establecidas. Los valores promedio de este catión medidos en el segundo ciclo fueron de 6,6 mmol l⁻¹ para el cultivo de lechuga y de 6,1 mmol l⁻¹ para el cultivo de rúcula. Estos valores se encuentran por encima del valor buscado y de lo recomendado por la bibliografía: 5,0 mmol l⁻¹ (Resh, 2001) y 3,7 mmol l⁻¹ (Rodríguez et al., 2001). Además, si se analiza cómo va variando la concentración con el correr de los días se puede observar una tendencia a concentrarse en la solución. Bugbee (2004) señala que el calcio se encuentra entre los nutrientes que son absorbidos pasivamente por las plantas y es consumido lentamente, lo que lleva a que sea frecuente su acumulación en las soluciones nutritivas. Van Os et al. (2016) refieren que el sodio interfiere con la absorción de calcio. Estas podrían ser explicaciones a los altos valores de calcio detectados y a la tendencia de acumularse en la solución.

Las concentraciones de sodio encontradas en la solución son altas. El resultado de la determinación de sodio en el agua de red que se utiliza para preparar la solución nutritiva fue de 1,6 mmol l⁻¹. Los valores promedio en la solución nutritiva fueron de 3,8 mmol l⁻¹ en el cultivo de lechuga y de 5,5 mmol l⁻¹ en la solución del cultivo de rúcula. Este catión en la solución se concentró con el correr de los días llegando a valores máximos de 4,8 mmol l⁻¹ y 6,5 mmol l⁻¹ en el cultivo de lechuga y rúcula respectivamente. Según Van der Lugt et al. (2020) el agua de irrigación con un nivel de sodio mayor a 1,5 mmol l⁻¹ no es adecuada para la recirculación de la solución nutritiva en sistemas hidropónicos. Además, Katsoulas et al. (2015) señalaron que si la concentración de sodio y cloro en el agua de irrigación es mayor de 1 a 3 mmol l⁻¹, dependiendo de la sensibilidad del cultivo a la salinidad, será inevitable un cambio periódico de la solución nutritiva para evitar pérdidas en el rendimiento. La salinidad altera la nutrición de las plantas con disminuciones significativas en el rendimiento (Bres et al., 2022).

A partir de los valores encontrados de sodio, es posible que este catión haya afectado a las plantas de dos maneras: (1) Por su alta concentración puede estar causando toxicidad para las plantas y afectar algunos de sus procesos. (2) Por su tendencia a concentrarse y llegar a valores altos, el sodio ocupa y compite por espacio con los nutrientes dentro de la solución nutritiva. Como la forma diaria de monitoreo de la solución se realiza a través de la conductividad eléctrica buscando llegar a un valor objetivo, no es posible discriminar qué porcentaje de esa conductividad está siendo determinada por nutrientes necesarios o iones innecesarios. A medida que el porcentaje de iones innecesarios dentro de la conductividad aumenta, en cada recarga que se realiza

de fertilizante se va agregando menos cantidad de nutrientes necesarios. Estos efectos fueron seguramente más severos para la rúcula debido a los mayores valores medidos en este cultivo. De acuerdo a Silva (2014), la salinidad puede causar antagonismos iónicos causando una disminución del crecimiento y desarrollo de las plantas debido a un desbalance nutricional causado por la alta concentración de sodio en la solución nutritiva inhibiendo y afectando la absorción de otros cationes.

La conductividad es un método indirecto y rápido de medir la concentración total de iones, incluyendo nutrientes disueltos en la solución (Nemali, 2018). Una práctica corriente en hidroponía es mantener la conductividad en un nivel objetivo en la solución reciclada midiendo con frecuencia y ajustando la conductividad mediante el agregado de agua y nutrientes. Se asume que se puede mantener un nivel adecuado de nutrientes para las plantas manteniendo la conductividad en el nivel objetivo. No obstante mantener la solución en el nivel objetivo de conductividad no asegura que exista una concentración óptima de los nutrientes en la solución (Miller et al., 2020). Esto quedó demostrado en este trabajo, donde la CE promedio de la solución nutritiva se mantuvo dentro de los rangos aceptables ($1,4 - 1,8 \text{ dS m}^{-1}$) mientras que la concentración de iones medidos estuvo notoriamente fuera de los rangos deseados.

5.3. ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA Y RENDIMIENTO

5.3.1. Cultivo de lechuga

La acumulación de materia seca a lo largo del ciclo muestra un comportamiento exponencial. Es decir, a medida que pasan los días la ganancia de peso seco en el cultivo de lechuga tiende a ser cada vez mayor produciéndose la máxima tasa de crecimiento al final de ciclo. Estos datos son concordantes con lo descrito por distintos autores como El-Nakhel et al. (2019) que encontraron un crecimiento exponencial de peso fresco y peso seco del cultivar Salanova manteca verde. El porcentaje de materia seca medido en lechuga decreció a medida que la planta aumentaba su peso (exceptuando el último tramo del primer ciclo donde pareciera haberse estabilizado alrededor del 4%). Este porcentaje tuvo valores máximos de 7,5% al comienzo del ciclo y llegó a 3,5% de materia seca como valor mínimo. El porcentaje promedio de materia seca durante el primer ciclo fue de 5,0% mientras que en el segundo ciclo fue de 6,3%.

Además, se puede observar que en el primer ciclo (otoñal) se llegó a un rendimiento de 9,6% más de peso fresco que el segundo ciclo (estival) pero con un largo de ciclo

53,6% mayor desde el momento de trasplante. En cambio, si analizamos el peso seco, el rendimiento por planta del primer ciclo fue 14,4% menor respecto al segundo ciclo. Es decir, el primer ciclo (otoñal) obtuvo mayores rendimientos en peso fresco y acumuló menos materia seca con una duración del ciclo mayor. Los pesos frescos promedio de la parte aérea fueron de 206,9 g (ciclo otoñal) y 188,7 g (ciclo estival) menores a los alcanzados por Samarakoon et al. (2019) y por Monsees et al. (2019), que para lechuga Salanova manteca verde obtuvieron un peso fresco promedio de 263 g y 325,9 g respectivamente en cultivo hidropónico NFT. Además, otro dato que se indica en el cuadro 22 es que la ganancia de peso en las primeras dos semanas para ambos ciclos fue muy similar, aumentando considerablemente en la 3er semana (día 21). Esto coincide con lo descrito por Galván et al. (2016) que señala que el 60% del crecimiento total puede ocurrir en los últimos 20 días con la máxima tasa de crecimiento al final del ciclo comercial. Según Gutiérrez (2011), si los niveles de agua y nutrientes no son limitantes, en presencia de temperatura y radiación favorables se acelera el número de hojas formadas por unidad de tiempo, aumentado también el ancho de la hoja lo que se traduce en una mayor producción de biomasa. El índice de área foliar (IAF), aumenta con el crecimiento del cultivo hasta alcanzar un valor máximo, donde se produce la máxima interceptación solar y la tasa de crecimiento del cultivo también alcanza su valor máximo (Carranza, 2009).

En la comparación con datos de otros cultivos hay que tener en cuenta que hay variaciones en las condiciones de manejo de cultivo como la densidad de plantación, temperatura y radiación que pueden influir en las diferencias de rendimiento. Además, la decisión del momento de cosecha en los cultivos evaluados estuvo condicionada por factores comerciales. Por ende, se hace difícil la comparación con otras situaciones productivas. Incluso la comparación del rendimiento final obtenido entre ciclos se dificulta, porque el momento de cosecha en los distintos ciclos estuvo condicionado a la demanda de lechuga de la empresa en los distintos momentos del año.

5.3.2. Cultivo de rúcula

En cuanto a la rúcula se observa un menor rendimiento en peso fresco promedio en el ciclo otoñal (45,64 g por unidad) que en el estival (55,38 g por unidad). En cuanto al peso seco promedio, se comportó en forma similar, con menor rendimiento en el ciclo otoñal (2,94 g por unidad) que en el estival (4,76 g por unidad). Estos rendimientos coinciden con los obtenidos por Oliveira et al. (2018),

quienes reportan rendimientos de 49,58 g de peso fresco y 3,5 g de peso seco por unidad.

En el caso de la rúcula el porcentaje máximo de materia seca fue 8,5% y se dio en el último muestreo del ciclo 2 mientras que el porcentaje mínimo fue de 5,7% y se dio en el primer muestreo del ciclo 1. El porcentaje promedio de materia seca durante el primer ciclo (otoñal) fue de 6,4% mientras que en el segundo ciclo (estival) fue de 7,7%. Los valores son similares a los obtenidos por Oliveira et al. (2018) que refieren porcentajes de materia seca de 7,75%.

Además de las diferencias de las condiciones ambientales, la comparación con los datos de otros cultivos se dificulta por la diferencia en el manejo de la densidad de plantación ya que la empresa utiliza 10-12 semillas por celda cuando la mayoría de los trabajos encontrados presentan datos por planta.

5.4. ANÁLISIS DE ABSORCIÓN DE NUTRIENTES

5.4.1. Cultivo de lechuga

Si se compara la concentración de nutrientes en la planta entre el 1er ciclo y el 2do ciclo, se puede apreciar que la absorción en el 2do ciclo (a pesar de ser de menor duración) alcanzó niveles de nitrógeno y potasio muy superiores a los del 1er ciclo. Esto puede deberse a que, en el 2do ciclo, la solución nutritiva aplicada presentó conductividad eléctrica de un 26% mayor que resultó en un aumento de 0,77 mmol l⁻¹ en la concentración media de potasio y de 2,95 mmol l⁻¹ en la concentración media de nitrato. Esta mayor conductividad permitió que en cada recarga de solución nutritiva se aportara más fertilizante a la solución que se encuentra recirculando en el sistema. De todas maneras, continuaron siendo valores muy deficientes de nitrógeno y potasio comparados con soluciones nutritivas de referencia.

Además, es evidente que las diferentes estaciones de cultivo influyeron en el mayor crecimiento y consumo de nutrientes en el cultivo de verano a los mismos días después de trasplante. Esto último concuerda con los ensayos de Fallovo et al. (2009) que evidencian que la concentración de nitrógeno y potasio en las plantas está altamente influenciada por factores estacionales y por la concentración de nutrientes en la solución

nutritiva. Las concentraciones de nitrógeno y potasio aumentan cuadráticamente en respuesta al incremento de la conductividad de la solución nutritiva.

El consumo de potasio se vio limitado por la baja concentración en la solución. Al igual que en los estudios de Valverde (2013), luego del día 15 DDT hubo un aumento rápido en la absorción de este catión. El potasio es el catión con mayor concentración en los tejidos de lechuga (Gent, 2014). Sin embargo, en este estudio en el primer ciclo la absorción de K^+ fue similar a la de N. Esto puede deberse a la baja concentración (cercana a 0) de K^+ que se observó en la solución nutritiva.

Dada las bajas concentraciones de nitrato y potasio medidos en la solución nutritiva se puede inferir que fueron una limitante en el consumo de estos nutrientes y por ende en el crecimiento de las plantas. La mayor concentración de nutrientes en la solución nutritiva en el segundo ciclo coincidió con una mayor tasa de crecimiento de la lechuga. Si bien las condiciones ambientales fueron diferentes y eso impactó sobre las tasas de crecimiento, es probable que el aumento de la fertilización contribuyera a la marcada diferencia entre tasas de crecimiento entre ciclos (no limitando el crecimiento).

5.4.2. Cultivo de rúcula

En el cultivo de rúcula, la concentración potasio fue mayor en el segundo ciclo en relación al primero, lo que se relaciona con la mayor disponibilidad de potasio en solución producto del aumento de la conductividad media de un 24,6% mayor con un aumento $0,75 \text{ mmol l}^{-1}$ en la concentración media de potasio.

En cuanto a los valores de nitrógeno foliar, los porcentajes del segundo ciclo fueron menores a los del primero. Silva et al. (2021) refieren un aumento significativo del contenido de nitrógeno en las hojas de rúcula con el aumento de contenido de N en la solución nutritiva. Las diferencias de los resultados con este ensayo pueden deberse a la incidencia de otras variables estacionales como temperatura, radiación, etc.

De todas formas, si se analiza la absorción de nitrógeno, los valores más altos están en el segundo ciclo debido a que el porcentaje de materia seca fue mayor en el cultivo estival que en el otoñal. La mayor conductividad en el segundo ciclo llevó a que la solución nutritiva tuviera un aumento de $3,3 \text{ mmol l}^{-1}$ en la concentración media de nitrato.

En cultivos hidropónicos, la adecuada concentración de nutrientes en solución es fundamental para obtener altos rendimientos en especial el nitrógeno y el potasio que

son los nutrientes más absorbidos en el cultivo de rúcula (Cavarianni et al., 2008, Grangeiro et al., 2011).

6. CONCLUSIONES E IMPLICANCIAS PRÁCTICAS DEL DIAGNÓSTICO REALIZADO

El control multiparamétrico de las condiciones de cultivo (conductividad, pH, concentración de nutrientes, concentración de oxígeno en solución, etc.) y de los parámetros ambientales (radiación, temperatura, humedad relativa, etc.) es necesaria para mejorar la producción hidropónica en ambientes controlados. La optimización de estos parámetros es necesaria para los objetivos de producción, tanto para la productividad como para la calidad del cultivo (Walters et al., 2020).

En esta tesis se realizó un diagnóstico de un sistema de producción comercial y se encontraron algunas debilidades que pueden conducir a pérdidas de eficiencia productiva. Las concentraciones de nitrato y potasio en la solución nutritiva estuvieron muy por debajo de los valores buscados y recomendados por la bibliografía. En cuanto al sodio se constató una concentración elevada en el agua de irrigación que aumentó con las recargas diarias de solución nutritiva realizadas al sistema. El pH promedio fue mayor al recomendado y buscado en ambos ciclos y cultivos. Por lo cual, se demostró que mediciones como las realizadas son necesarias para construir un plan de mejoras del sistema productivo basado en problemas detectados. Por lo tanto, la primera recomendación es implementar un sistema de monitoreo sistemático de parámetros clave que permitan identificar problemas oportunamente y diseñar propuestas de mejora en el manejo de los cultivos.

El trabajo corrobora que la conductividad (único parámetro medido en la empresa previo al estudio) no es un buen indicador de la concentración de nutrientes dentro de la solución. El manejo sólo basado en CE condujo a errores en cuanto a dosis de nutrientes. Por lo que sería recomendable el análisis periódico de nutrientes para ser más precisos en cuánto y cuáles nutrientes aplicar y en qué dosis al momento de la formulación de la solución nutritiva. Esto podría realizarse tanto mediante sistemas de análisis rápido a nivel de campo como en laboratorio. Los sistemas de análisis rápido de nutrientes han demostrado ser herramientas muy útiles a nivel de predios (Grasso et al., 2021). La dinámica acelerada de los cultivos de hoja en hidroponía requiere de la toma de decisiones diaria. Los sistemas de análisis rápidos ofrecen una alternativa, ya que son relativamente baratos, rápidos y fáciles de utilizar. Además, son precisos y de calibración sencilla a la vez de permitir realizar medidas directamente en el campo (Maggini et al., 2010, Thompson et al., 2009, Grasso, 2018).

La hidroponía requiere de agua de muy buena calidad (baja salinidad y bajo contenido de iones no deseados) (Schwarz et al., 2005). Mejorar las características del

agua utilizada para la solución nutritiva podría resultar en un aumento en los rendimientos y en prolongar los plazos de la renovación de la solución nutritiva con ahorro de agua, fertilizantes, mano de obra y beneficios medioambientales. Esto podría lograrse mediante estrategias como la recolección de agua de lluvia de los techos de los invernaderos (Schwarz et al., 2005), como única fuente o para utilizar como mezcla con el agua de red. También se podría valorar la utilización de agua de las napas freáticas subterráneas (agua de pozo) realizando previamente análisis de calidad de la misma. Otra opción sería incorporar un método de filtración del agua como puede ser ósmosis inversa para quitarle los iones no deseados y partir con una mayor estabilidad de la solución (Christie y Nichols, 2014).

Esta tesis aporta una metodología de diagnóstico y detección de problemas en un sistema hidropónico. Si bien las recomendaciones que se realizan son para este caso en particular, la metodología propuesta puede ser aplicada a otros sistemas de forma de detectar problemas a solucionar para cada caso particular, constituyendo una herramienta aplicable a cualquier sistema hidropónico.

7. RESUMEN

En Uruguay la producción hidropónica ha despertado interés en los últimos años surgiendo diversos emprendimientos en su mayoría asociados al cultivo de hortalizas de hoja. Al momento es escasa la información científica a nivel local sobre el manejo de estos sistemas. Esta tesis tuvo como objetivo analizar un sistema de producción hidropónico NFT recirculante comercial en la zona sur de Uruguay, evaluando dos ciclos de cultivo de lechuga y de rúcula haciendo énfasis en características de la solución nutritiva, además de la evaluación del crecimiento, rendimiento y en la cuantificación del consumo de nutrientes. El estudio reveló que a pesar de que la conductividad eléctrica de la solución nutritiva se mantuvo dentro de los rangos buscados, las concentraciones de nitrato y potasio estuvieron muy por debajo de los valores buscados y recomendados por la bibliografía. Estas bajas concentraciones fueron contrarrestadas por altos niveles de sodio y calcio. El sodio se encontró en concentración elevada en el agua de irrigación. El pH promedio fue mayor al recomendado y buscado en ambos ciclos y cultivos pudiendo ocasionar dificultad para la absorción de algunos nutrientes como fósforo (P) y manganeso (Mn). Se corroboró que la conductividad es un indicador importante para el monitoreo de la solución nutritiva pero nos da información insuficiente si se utiliza como único parámetro de control. En base al diagnóstico realizado, se recomienda implementar un sistema de monitoreo sistemático de algunos nutrientes (nitrato, potasio, calcio y sodio) en la solución con sistemas de análisis rápido a campo y/o análisis de laboratorio. El seguimiento de la evolución de la concentración de nutrientes permite identificar oportunamente excesos y déficits, que permitan realizar los ajustes necesarios, maximizando las tasas de crecimiento y los rendimientos. La aplicación de estrategias para mejorar las características del agua utilizada para la solución nutritiva (uso de agua de lluvia, pozo, filtración del agua) pueden resultar en un aumento en los rendimientos y en prolongar los plazos de la renovación de la solución nutritiva con ahorro de agua, fertilizantes, mano de obra y beneficios medioambientales. Este trabajo aporta datos de un sistema de producción en NFT, manejo y consumo de nutrientes de lechuga y rúcula hidropónica obtenidos de una situación real de producción en Uruguay. Además aporta una metodología de diagnóstico y detección de problemas en un sistema hidropónico constituyendo una herramienta aplicable a otros sistemas de cultivo sin suelo.

Palabras clave: hidroponía, técnica de la película nutriente, nft, lechuga, rúcula, solución nutritiva, monitoreo y control multiparamétrico

8. SUMMARY

In Uruguay, hydroponic production has aroused interest in recent years, with the emergence of various ventures, mostly associated with the cultivation of leafy vegetables. At the moment, there is little scientific information at the local level on the management of these systems. The objective of this thesis was to analyze a commercial recirculating NFT hydroponic production system in the south of Uruguay, evaluating two cultivation cycles of lettuce and arugula, emphasizing the characteristics of the nutrient solution, in addition to the evaluation of growth, yield and quantification of nutrient intake. The study revealed that although the electrical conductivity of the nutrient solution remained within the ranges sought, the concentrations of nitrate and potassium in the nutrient solution were well below the values sought and recommended by the literature. These low concentrations were counteracted by high levels of sodium and calcium. Sodium was found in a high concentration in the irrigation water. The average pH was higher than recommended and sought in both cycles and crops, which could cause difficulty in the absorption of some nutrients such as phosphorus (P) and manganese (Mn). It was confirmed that conductivity is an important indicator for monitoring the nutrient solution, but it gives us insufficient information if it is used as the only control parameter. Based on the diagnosis made, it is recommended to implement a systematic monitoring system for some nutrients (nitrate, potassium, calcium and sodium) in the solution with rapid field analysis systems and/or laboratory analysis. The monitoring of the evolution of the nutrient concentration allows timely identification of excesses and deficits, which allow the necessary adjustments to be made, maximizing growth rates and yields. The application of strategies to improve the characteristics of the water used for the nutritive solution (use of rainwater, well, water filtration) can result in an increase in yields and in prolonging the terms of the renewal of the nutritive solution with savings of water, fertilizers, labor and environmental benefits. This work provides data from a production system in NFT, management and nutrient consumption of hydroponic lettuce and arugula obtained from a real production situation in Uruguay. It also provides a methodology for diagnosing and detecting problems in a hydroponic system, constituting a tool applicable to other soilless cultivation systems.

Keywords: hydroponics, nutrient film technique, nft, lettuce, arugula, nutrient solution, monitoring and multiparametric control

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Barbosa, G. L.; Gadelha, F. D.; Kublik, N.; Proctor, A.; Reichelm, L.; Weissinger, E.; Wohlleb, G. M.; Halden, R. U. 2015. Comparison of Land, Water, and Energy Requirements of Lettuce Grown Using Hydroponic vs. Conventional Agricultural Methods. (en línea). International Journal of Environmental Research and Public Health. 12(6): 6879 - 6891. Consultado may. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>
2. Barrera, C. 2020. Evaluación del efecto de la intensidad de mallas fotoselectivas en cultivo sin suelo. (en línea). Tesis Ing. Agrícola. Almería, España. Universidad de Almería. Escuela Superior de Ingeniería. 69 p. Consultado mar. 2022. Disponible en <http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/9748/BARRERA%20ALARCON%2C%20CARMEN%20MARIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
3. Beltrano, J. 2015. Introducción al cultivo hidropónico. (en línea). In: Beltrano, J.; Giménez, O. coord. Cultivo en hidroponía. La Plata, Universidad Nacional de La Plata. pp. 10 - 33. Consultado may. 2022. Disponible en http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
4. Benton Jones, J. 2014. Complete Guide for Growing Plants Hydroponically. (en línea). South Carolina, CRC, Taylor & Francis. 183 p. Consultado may. 2022. Disponible en https://www.academia.edu/28995533/Complete_Guide_for_Growing_Plants_Hydroponically

5. Bisbis, M. B.; Gruda, N.; Blanke, M. 2018. Potential impacts of climate change on vegetable production and product quality: a review. (en línea). Journal of Cleaner Production. 170: 1602 - 1620. Consultado set. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.224>
6. Brechner, M.; Both, A. 2013. Hydroponic Lettuce Handbook. (en línea). New York, Cornell University. 48 p. Consultado feb. 2022. Disponible en: <https://cpb-us-e1.wpmucdn.com/blogs.cornell.edu/dist/8/8824/files/2019/06/Cornell-CEA-Lettuce-Handbook-.pdf>
7. Brenes, L.; Jiménez, M. 2014. Experiencia de producción de lechuga americana (*Lactuca sativa*) hidropónica, tipo NFT. (en línea). Revista Tecnología en Marcha. 27: 57 - 64. Consultado feb. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.18845/tm.v27i0.2015>
8. Bres, W.; Kleiber, T.; Markiewicz, B.; Mieloszyk, E.; Mieloch, M. 2022. Effect of NaCl Stress on the Response of Lettuce (*Lactuca sativa* L.). (en línea). Agronomy. 12(2): 244. Consultado feb. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.3390/agronomy12020244>
9. Broadley, M.; Escobar-Gutiérrez, A.; Burns, A.; Burns, I. 2000. What are the effects of nitrogen deficiency on growth components of lettuce? (en línea). New Phytologist. 147(3): 519 - 526. Consultado mar. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00715.x>
10. Bugbee, B. 2004. Nutrient management in recirculating hydroponic culture. (en línea). Acta Horticulturae. no. 648: 99 - 112. Consultado may. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.12>

11. Carbone, A. 2015. Los nutrientes minerales. *In:* Beltrano, J.; Giménez, D. coord. Cultivo en hidroponía. (en línea). La Plata, Universidad Nacional de La Plata. pp. 62 - 79. Consultado may. 2022. Disponible en http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
12. Carotti, L.; Graamans, L.; Puksic, F.; Butturini, M.; Meinen, E.; Heuvelink, E.; Stanghellini, C. 2021. Plant Factories Are Heating Up: Hunting for the Best Combination of Light Intensity, Air Temperature and Root-Zone Temperature in Lettuce Production. (en línea). *Frontiers in Plant Science*. 11: 592171. Consultado mar. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.592171>
13. Carranza, C. 2009. Análisis del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) “Batavia” cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*. 27(1): 41 - 48.
14. Carrasco, G.; Izquierdo, J. 1996. La empresa hidropónica de mediana escala: la técnica de la solución nutritiva recirculante (“NFT”). (en línea). Talca, Universidad de Talca. 62 p. Consultado dic. 2022. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Gilda-Carrasco-2/publication/277012808_La_empresa_hidroponica_de_mediana_escal_la_tecnica_de_la_solucion_nutritiva_recirculante_NFT/links/5f05e049299bf188160a65a7/La-empresa-hidroponica-de-mediana-escala-la-tecnica-de-la-solucion-nutritiva-recirculante-NFT.pdf?origin=publication_detail
15. _____. 2004. Sistema NFT, requerimientos y usos. *In:* Urrestarazú, G. M. Tratado de cultivo sin suelo. 3ª. ed. rev. y ampl. Madrid, Mundi Prensa. pp. 541 - 554.

16. Castañares, J. 2020. ABC de la hidroponía. (en línea). Buenos Aires. INTA. 15 p. Consultado mar. 2022. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_amba_-_abc_de_la_hidroponia.pdf
17. Cavarianni, R. L.; Cecílio Filho, A. B.; Cazetta, J. O.; May, A.; Corradi, M. M. 2008. Nutrient contents and production of rocket as affected by nitrogen concentrations in the nutritive solution. (en línea). Scientia Agricola. 65(6): 652 - 658. Consultado dic. 2022. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162008000600013>
18. Christie, B.; Nichols, M. 2014. Salinity and hydroponics. (en línea). Practical Hydroponics and Greenhouses. 142: 40 - 49. Consultado feb. 2022. Disponible en <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.202531581211241>
19. Chun, C.; Takakura, T. 1994. Rate of root respiration of lettuce under various dissolved oxygen concentrations in hydroponics. (en línea). Environment Control in Biology. 32(2): 125 - 135. Consultado mar. 2022. Disponible en https://www.jstage.jst.go.jp/article/ecb1963/32/2/32_2_125/_pdf/-char/en
20. Chutichudet, B.; Chutichudet, P.; Kaewsit, S. 2011. Influence of Developmental Stage on Activities of Polyphenol Oxidase, Internal Characteristics and Colour of Lettuce cv. Grand Rapids. (en línea). American Journal of Food Technology. 6: 215 - 225. Consultado feb. 2022. Disponible en <https://dx.doi.org/10.3923/ajft.2011.215.225>

21. Cloutier, G. R.; Dixon, M. A.; Arnold, K. E. 1997. Evaluation of sensor technologies for automated control of nutrient solutions in life support systems using higher plants. (en línea). In: European Symposium on Space Environmental Control Systems (6th., 1997, Noordwijk, Netherlands). Proceedings. Noordwijk, ESA. pp. 851 - 858. Consultado feb. 2022. Disponible en <https://adsabs.harvard.edu/full/1997ESASP.400..851G>
22. Colonna, E.; Roupheal, Y.; Barbieri, G.; De Pascale, S. 2016. Nutritional quality of ten leafy vegetables harvested at two light intensities. (en línea). Food Chemistry. 199: 702 - 710. Consultado feb. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.068>
23. Currey, C. J. 2018. Lettuce and leafy greens 101: a production guide. (en línea). Valley View, Produce Grower. s.p. Consultado mar. 2022. Disponible en <https://www.producegrower.com/article/lettuce-and-leafy-greens-101-a-production-guide/>
24. _____.; Imbler, C. 2020. Managing air temperature for specialty leafy greens. (en línea). Michigan, Greenhouse Product News. s.p. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://gpnmag.com/article/managing-air-temperature-for-specialty-leafy-greens/>
25. Del Pino, M. 2012. El cultivo de rúcula. (en línea). La Plata, Universidad Nacional de La Plata. s.p. Consultado may. 2022. Disponible en <https://contactorural.wordpress.com/2012/06/12/el-cultivo-de-rucula/>

26. El-Nakhel, C.; Giordano, M.; Pannico, A.; Carillo, P.; Fusco, G.; De Pascale, S.; Rouphael, Y. 2019. Cultivar-Specific Performance and Qualitative Descriptors for Butterhead Salanova Lettuce Produced in Closed Soilless Cultivation as a Candidate Salad Crop for Human Life Support in Space. (en línea). *Life*. 9(3): 61. Consultado feb. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.3390/life9030061>
27. Fallovo, C.; Rouphael, Y.; Rea, E.; Battistelli, A.; Colla, G. 2009. Nutrient solution concentration and growing season affect yield and quality of *Lactuca sativa* L. var. *acephala* in floating raft culture. (en línea). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 89(10): 1682 - 1689. Consultado oct. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1002/jsfa.3641>
28. Fontana, E.; Nicola, S. 2009. Traditional and soilless culture systems to produce corn salad (*Valerianella olitoria* L.) and rocket (*Eruca sativa* Mill.) with low nitrate content. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 7(2): 405 - 410.
29. Furlani, P. R. 1998. Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica de Hidroponia - NFT. 2ª. ed. Campinas, Instituto Agronómico. 30 p.
30. Galván, G.; Rodríguez, J. 2008. Cultivos de hoja: lechuga: generalidades y ecofisiología. Montevideo, Facultad de Agronomía. 19 p.
31. _____.; García, M.; Rodríguez, J. 2016. Lechuga: cultivos de hoja. Montevideo, Facultad de Agronomía. 67 p.
32. Gent, M. P. 2014. Effect of Daily Light Integral on Composition of Hydroponic Lettuce. (en línea). *HortScience*. 49(2): 173 - 179. Consultado mar. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.2.173>

33. _____. 2016. Effect of temperature on composition of hydroponic lettuce. (en línea). *Acta Horticulturae*. no. 1123(13): 95 - 100. Consultado set. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1123.13>
34. Gilsanz, J. C. 2007. Hidroponía. Las Brujas, INIA. 30 p. (Serie Actividades de Difusión no. 509).
35. Gislerod, H.; Adams, P. 1983. Diurnal variations in the oxygen content and acid requirement of recirculating nutrient solutions and in the uptake of water and potassium by cucumber and tomato plants. *Scientia Horticulturae*. 21: 311 - 321.
36. Goto, E.; Both, A. J.; Albright, L. D.; Langhans, R. W.; Leed, A. R. 1996. Effect of dissolved oxygen concentration on lettuce growth in floating hydroponics. (en línea). *Acta Horticulturae*. no. 440: 205 - 210. Consultado mar. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1996.440.36>
37. Grangeiro, L. C.; Oliveira, F.; Negreiros, M.; Marrocos, S.; Lucena, R.; Oliveira, R. 2011. Crescimento e acúmulo de nutrientes em coentro e rúcula. (en línea). *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. 6(1): 11 - 16. Consultado jun. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.5039/agraria.v6i1a634>
38. Grasso, R. 2018. Evaluación de dos sistemas de análisis rápido para la determinación de la concentración de varios nutrientes en solución nutritiva y en solución de suelo. Tesis Máster en Horticultura Mediterránea bajo Invernadero. Almería, España. Universidad de Almería. Escuela Superior de Ingeniería. 16 p.
39. _____.; Berrueta, C.; Giménez, G. 2021. Monitoreo de nutrientes para la asistencia a la fertirrigación a nivel de predios. *Revista INIA*. no. 66: 108 - 112.

40. Gutiérrez, J. 2011. Comportamiento de tres cultivares de lechuga (*Lactuca sativa* L.), evaluados al aire libre, en Valdivia. Tesis Ing. Agr. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 76 p.
41. Henry, J.; Whipker, B.; Owen, G.; Currey, C. 2018. Lettuce (*Lactuca sativa*). (en línea). Nutritional Monitoring Series. 1(13): 7 p. Consultado mar. 2022. Disponible en <https://hortamericas.com/wp-content/uploads/2018/04/e-gro-Nutritional-Factsheet-Lettuce.pdf>
42. IBISWorld, US. 2022. Hydroponic Crop Farming: Market Research Report. (en línea). Los Angeles. s.p. Consultado oct. 2022. Disponible en <https://www.ibisworld.com/united-states/market-research-reports/hydroponic-crop-farming-industry/>
43. Ibrahim, R.; Zuki, W. A. M. 2013. The Physico-Chemical Properties of lettuce (*Lactuca Sativa* 'Grand Rapid') Grown Under Different Planting Methods. (en línea). Acta Horticulturae. no. 1012(21): 201 - 206. Consultado set. 2022. Disponible en http://www.actahort.org/books/1012/1012_21.htm
44. Intagri (Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura, MX). 2017a. La hidroponía: cultivos sin suelo. (en línea). Méjico. 5 p. (Serie Horticultura Protegida no. 29). Consultado dic. 2022. Disponible en <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/la-hidroponia-cultivos-sin-suelo>
45. _____. 2017b. La industria de los cultivos hidropónicos. (en línea). Méjico. 4 p. (Serie Horticultura Protegida no. 31). Consultado dic. 2022. Disponible en <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/la-industria-de-los-cultivos-hidroponicos>

46. Islam, A.; Edwards, D.; Asher, C. 1980. pH optima for crop growth. (en línea). Plant and Soil. 54: 339 - 357. Consultado mar. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1007/BF02181830>
47. Juge, N.; Mithen, R. F.; Traka, M. 2007. Molecular basis for chemoprevention by sulforaphane: a comprehensive review. (en línea). Cellular and Molecular Life Sciences. 64(9): 1105 - 1127. Consultado oct. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s00018-007-6484-5>
48. Kaiser, C.; Ernst, M. 2017. Leafy Greens. (en línea). Kentucky, University of Kentucky, College of Agriculture, Food and Environment. 4 p. Consultado feb. 2023. Disponible en <https://www.uky.edu/ccd/sites/www.uky.edu.ccd/files/leafygreens.pdf>
49. Katsoulas, N.; Savvas, D.; Bartzanas, T.; Kittas, C. 2015. Model-based control of water and nutrient discharge in a tomato crop grown in a semi-closed soilless system as influenced by the drainage fraction. (en línea). Computers and Electronics in Agriculture. 113: 61 - 71. Consultado abr. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.01.014>
50. Khan, K. A.; Yan, Z.; He, D. 2018. Impact of light intensity and nitrogen of nutrient solution on nitrate content in three lettuce cultivars prior to harvest. (en línea). Journal of Agricultural Science. 10(6): 99 - 109. Consultado oct. 2022. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/3d75/6913e75bc90b42237608452c270235b6c20e.pdf>
51. Maggini, R.; Carmassi, G.; Incrocci, L.; Pardossi, A. 2010. Evaluation of quick test kits for the determination of nitrate, ammonium and phosphate in soil and in hydroponic nutrient solutions. Agrochimica. 54: 331 - 341.

52. Martínez, G.; Ortiz, Y.; Lopez, R. 2012. Oxigenación de la solución nutritiva recirculante y su efecto en tomate y lechuga. (en línea). Revista Fitotecnia Mexicana. 35(5): 49 - 52. Consultado set. 2021. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/610/61024388009.pdf>
53. Matos, T. S.; Nascimento, E. C.; Genuncio, G. C. 2016. Consumo de rúcula está em plena expansão. (en línea). Campo & Negócios. oct. 2016. Consultado set. 2020. Disponible en <https://revistacampoenegocios.com.br/consumo-de-rucula-esta-em-plena-expansao>
54. Mattson, N.; Merrill, T. 2015. Symptoms of Common Nutrient Deficiencies in Hydroponic Lettuce. (en línea). e-Gro Research Update. oct. 2015. 10 p. Consultado mar. 2022. Disponible en https://www.e-gro.org/pdf/Mattson_Lettuce_2015_9.pdf
55. Mercado Modelo, UY. 2020. Anuario estadístico 2020. (en línea). Montevideo. 65 p. Consultado feb. 2022. Disponible en https://www.uam.com.uy/images/DESARROLLO_COMERCIAL/InformeAnual/Anuario_Estad%C3%ADstico_Mercado_Modelo_2020_Observatorio_Granjero.pdf
56. Meselmani, M. A. A. 2022. Nutrient Solution for Hydroponics. (en línea). In: Turan, M.; Argin, A.; Yildirim, E.; Güneş, A. eds. Soilless Culture. London, IntechOpen. s.p. Consultado mar. 2022 Disponible en <https://www.intechopen.com/online-first/80089>

57. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2017. Encuestas Hortícolas 2015-2016: Zonas Sur y Litoral Norte. (en línea). Montevideo. 18 p. Consultado nov. 2022. Disponible en https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/texto_publicacion_horticolas_2015.pdf
58. _____. OPYPA (Oficina de Programación y Política Agropecuaria. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, UY). 2014. Anuario, análisis sectorial y cadenas productivas. Montevideo. 648 p.
59. Miller, A.; Adhikari, R.; Nemali, K. 2020. Recycling Nutrient Solution Can Reduce Growth Due to Nutrient Deficiencies in Hydroponic Production. (en línea). *Frontiers in Plant Science*. 11: 607643. Consultado abr. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.607643>
60. Monsees, H.; Suhl, J.; Paul, M.; Kloas, W.; Dannehl, D.; Würtz, S. 2019. Lettuce (*Lactuca sativa*, variety Salanova) production in decoupled aquaponic systems: Same yield and similar quality as in conventional hydroponic systems but drastically reduced greenhouse gas emissions by saving inorganic fertilizer. (en línea). *PLoS ONE* 14(6): e0218368. Consultado abr. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218368>
61. Morgan, L. 1999. Hydroponic lettuce production: a comprehensive, practical and scientific guide to commercial hydroponic lettuce production. s.l., Casper. 112 p.
62. Msayleb, N. 2014. Soil Ozonation as a Sustainable Alternative to Methyl Bromide Fumigation and Synthetic Pesticides. (en línea). Ph.D. Thesis. Ames, USA. Iowa State University. 116 p. Consultado abr. 2022. Disponible en <https://mobt3ath.com/uplode/books/book-16299.pdf>

63. Navarro, G.; Navarro, S. 2014. Fertilizantes: Química y acción. Madrid, Mundi-Prensa. 229 p.
64. Nemali, K. 2018. Details of Electrical Conductivity measurements in Greenhouse Production. (en línea). Purdue Extension. mar. 2018. 6 p. Consultado abr. 2022. Disponible en <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/HO/HO-286-w.pdf>
65. Observatorio Granjero, UY. 2014. Lechuga producción y comercio en el Uruguay. (en línea). Montevideo. 8 p. Consultado ago. 2022. Disponible en <https://docplayer.es/25241775-Lechuga-produccion-y-comercio-en-el-uruguay.html>
66. _____. 2017. Frutas y hortalizas en el Uruguay. Montevideo. 128 p.
67. Oliveira, F.; Neto, J.; Oliveira, M.; Lima, L.; Nascimento, L.; Cordeiro, C.; Alves, F.; Miranda, F.; Neta, H. 2018. Response of Arucula Cultivars to Saline Nutritive Solution Enriched with Potassium Nitrate. (en línea). Journal of Agricultural Science. 10(11): 269 - 279. Consultado jun. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.5539/jas.v10n11p269>
68. Parent, S. 2021. ¿Cómo influye la humedad en la calidad de los cultivos? (en línea). s.l., Premier Tech Horticulture. s.p. Consultado nov. 2022. Disponible en <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/como-influye-la-humedad-en-la-calidad-de-los-cultivos/>
69. Park, M. H.; Lee, Y. B. 2001. Effects of CO₂ concentration, light intensity and nutrient level on growth of leaf lettuce in a plant factory. (en línea). Acta Horticulturae. no. 548: 377 - 384. Consultado set. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.548.43>

70. Peery, J. 2016. How does humidity influence crop quality. (en línea). s.l., Hortidaily. s.p. Consultado nov. 2022. Disponible en <https://www.hortidaily.com/article/6024779/how-does-humidity-influence-crop-quality/>
71. Podsędek, A. 2007. Natural antioxidants and antioxidant capacity of Brassica vegetables: a review. (en línea). LWT-Food Science and Technology. 40(1): 1 - 11. Consultado oct. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.07.023>
72. Puerta, A. 2020. Cultivo en sustrato en hidroponía una tecnología en auge. (en línea). INTA Informa. dic. 2020. s.p. Consultado set. 2022. Disponible en <https://intainforma.inta.gob.ar/cultivo-en-sustrato-e-hidroponia-una-tecnologia-en-auge/>
73. Resh, H. 2001. Cultivos hidropónicos: nuevas técnicas de producción. 5ª. ed. rev. y ampl. Madrid, Mundi-Prensa. 558 p.
74. Rodríguez, A.; Hoyos, M.; Chang, M. 2001. Soluciones Nutritivas en Hidroponia. Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina. 97 p.
75. Rusu, T.; Moraru, P. I.; Mintas, O. S. 2021. Influence of environmental and nutritional factors on the development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) microgreens grown in a hydroponic system: a review. (en línea). Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 49(3): 12427. Consultado mar. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.15835/nbha49312427>
76. Saavedra, G. 2017. Manual de producción de Lechuga. (en línea). Santiago, INIA. 153 p. (Boletín INIA no. 374). Consultado may. 2021. Disponible en https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/29500/INIA_Libro_0051.pdf?sequence=1&isAllowed=y

77. Samarakoon, U.; Fyffe, C.; Bale, J.; Ling, P.; Basnagala, S.; Donley, N.; Altland, J. 2019. Effect of electrical conductivity on the productivity and nutrient uptake of *Lactuca sativa* L. grown using nutrient film technique (NFT). (en línea). *Acta Horticulturae*. no. 1266: 137 - 144. Consultado may. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1266.19>
78. Savvas, D.; Gianquinto, G.; Tuzel, Y.; Gruda, N. 2013. Soilless culture. In: FAO (Food and Agriculture Organization, IT). *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops: principles for Mediterranean climate areas*. Roma. 640 p. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://www.fao.org/3/i3284e/i3284e.pdf>
79. _____.; Gruda, N. 2018. Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry: a review. (en línea). *European Journal of Horticultural Science* 83(5): 280 - 293. Consultado set. 2022. Disponible en <http://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>
80. Schwarz, D.; Grosch, R.; Gross, W.; Hoffmann-Hergarten, S. 2005. Water quality assessment of different reservoir types in relation to nutrient solution use in hydroponics. (en línea). *Agricultural Water Management*. 71 (2): 145 - 166. Consultado oct. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.07.005>
81. Shi, R. 2019. Effects of air and root-zone temperatures on growth and quality of indoor hydroponic lettuce. (en línea). Master of Science Thesis. Auburn, United States. Auburn University. Graduate Faculty. 52 p. Consultado oct. 2022. Disponible en <https://etd.auburn.edu/bitstream/handle/10415/6974/Ran%20Shi%27%20Thesis%20.pdf?sequence=2>

82. Silva, A. O. 2014. A fertirrigação e o processo de salinização de solos em ambiente protegido. (en línea). Revista Nativa Pesquisas Agrárias e Ambientais. 2(3): 180 - 186. Consultado mar. 2022. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/e04d/ac57692f1641858cb1b3f0f2fae23c4de134.pdf>
83. Silva, P. H.; Filho, A. B. C.; dos Reis, I.; Nascimento, C. 2021. Rocket plants in response to nitrogen concentration in nutrient solution. (en línea). Horticultura Brasileira. 39(3): 341 - 345. Consultado jul. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20210316>
84. Singh, S.; Singh, B. 2012. Hydroponics: a technique for the cultivation of vegetables and medicinal plants. In: Global Conference on Horticulture for Food, Nutrition and Livelihood Options (4th., 2012, Bhubaneshwar, Odisha, India). Proceedings. s.n.t. p. 220.
85. Sonneveld, C. 2002. Composition of Nutrient Solutions. In: Savvas, D.; Passam, H. C. eds. Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals. Athens, Embryo Publications. pp. 179 - 210.
86. _____.; Voogt, W. 2009. Plant Nutrition of Greenhouse Crops. New York, Springer. 431 p.
87. Stephens, J. 2006. Arugula - Eruca sativa Mill. (en línea). Florida, University of Florida. s.p. Consultado oct. 2022. Disponible en <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/MV010>
88. Sutcliffe, J. 1984. Las plantas y el agua. Barcelona, Omega. 67 p.

89. Thompson, R. B.; Gallardo, M.; Joya, M.; Segovia, C.; Martínez Gaitán, C.; Granados, M. R. 2009. Evaluation of rapid analysis systems for on-farm nitrate analysis in vegetable cropping. Spanish Journal of Agricultural Research. 7: 200 - 211. Consultado nov. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.5424/sjar/2009071-412>
90. Trejo-Téllez, L. I.; Gómez-Merino, F. C. 2012. Nutrient solutions for hydroponic systems. (en línea). In: Toshiki, A. ed. Hydroponics: a Standard Methodology for Plant Biological Researches. Rijeka, InTech. 256 p. Consultado mar. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.5772/37578>
91. Ubilla, J.; Gilsanz, J. C. 1995. Manejo y variedades en el cultivo de la lechuga. Montevideo, INIA. 11 p. (Serie Actividades de Difusión no. 59). Consultado mar. 2022. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/566/1/18429180808130418.pdf>
92. Urrestarazú, M. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. 3ª. ed. rev. y ampl. Madrid, Mundi-Prensa. 914 p.
93. _____. 2015. Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía. Madrid, Mundi-Prensa. 267 p.
94. Valverde, J. 2013. Establecimiento de dos curvas de absorción para dos tipos de lechuga bajo sistema hidropónico NFT modificado. Tesis Ing. Agr. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. Escuela de Agronomía. Facultad de Ciencias Agroalimentarias. 63 p.

95. Van der Lugt, G.; Holwerda, H. T.; Hora, K.; Bugter, M.; Hardeman, J.; de Vries, P. 2020. Nutrient Solutions for Greenhouse Crops. (en línea). 4ª. ed. Netherland, Eurofifins Agro, Geerten van der Lugt, Nouryon, SQM, Yara. 98 p. Consultado mar. 2022. Disponible en <https://www.nouryon.com/globalassets/inriver/resources/article-micronutrients-nutrient-solutions-for-greenhouse-crops-global-en.pdf>
96. Van Os, E. A.; Blok, C.; Voogt, W.; Waked, L. 2016. Water quality and salinity aspects in hydroponic cultivation. (en línea). Wageningen, University of Wageningen. 7 p. Consultado feb. 2022. Disponible en <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/403810>
97. Walters, K. J.; Behe, B. K.; Currey, C. J.; Lopez, R. G. 2020. Historical, Current, and Future Perspectives for Controlled Environment Hydroponic Food Crop Production in the United States. (en línea). HortScience. 55(6): 758 - 767. Consultado nov. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14901-20>
98. Wohanka, W. 2002. Nutrient Solution Disinfection. In: Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals. Athens, Embryo Publications. pp. 345 - 372.
99. Yang, T.; Samarakoon, U.; Altland, J.; Ling, P. 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. (en línea). Agronomy. 11(7): 1107 - 1340. Consultado mar. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.3390/agronomy11071340>

100. Yost, J. 2021. Determining effects of nutrient solution electrical conductivity and daily light integral on the growth of specialty leafy greens. (en línea). Thesis Master of Science. Iowa, USA. Iowa State University. 93 p. Consultado set. 2022. Disponible en <https://lib.dr.iastate.edu/etd/18642>

101. Zeroni, M.; Gale, J.; Ben-Asher, J. 1983. Root Aeration in a Deep Hydroponic System and its Effects on Growth and Yield of Tomato. (en línea). *Scientia Horticulturae*. 19: 213 - 220. Consultado oct. 2022. Disponible en [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(83\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0304-4238(83)90066-3)

10. ANEXOS

Anexo 1. Evaluación de crecimiento de lechuga

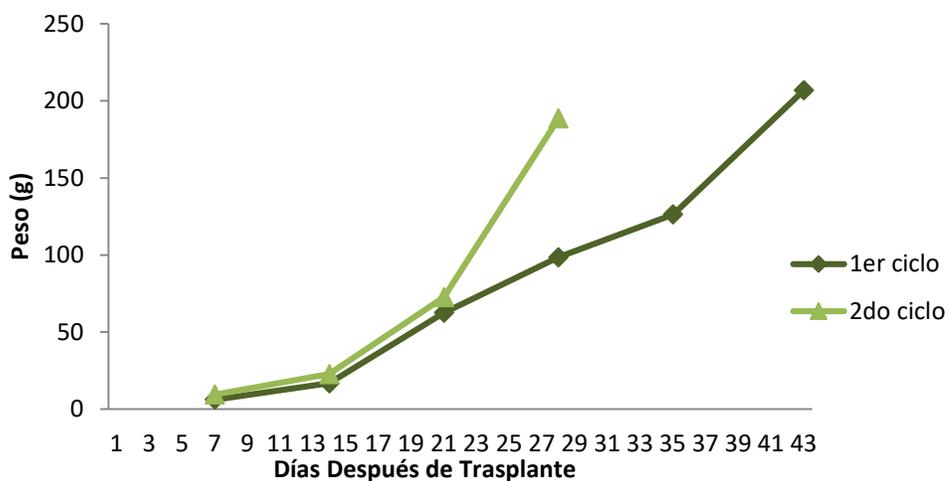


Figura 1. Peso fresco del cultivo de lechuga

Cuadro 1. Análisis foliar del cultivo de lechuga

CICLO	DDT	PESO			CONCENTRACIÓN		ABSORCIÓN	
		g		%	%		Kg ha ⁻¹	
		PF	PS	MS	N	K	N	K
1	7	6,1	0,5	7,5	3,5	3,2	4,0	3,7
	14	16,8	1,0	6,2	4,2	3,6	11,0	9,4
	21	62,5	2,7	4,3	5,2	4,5	34,4	29,8
	28	98,5	3,6	3,7	4,9	4,8	44,3	43,6
	35	126,3	5,7	4,5	4,8	4,5	68,6	64,2
2	7	9,4	0,7	7,4	3,0	3,8	5,2	6,7
	14	22,8	1,5	6,7	4,1	4,9	15,6	18,4
	21	72,6	4,2	5,8	3,7	5,8	39,5	60,9
	28	188,7	9,7	5,1	3,7	5,4	88,9	131,4

Anexo 2. Evaluación de crecimiento de rúcula.

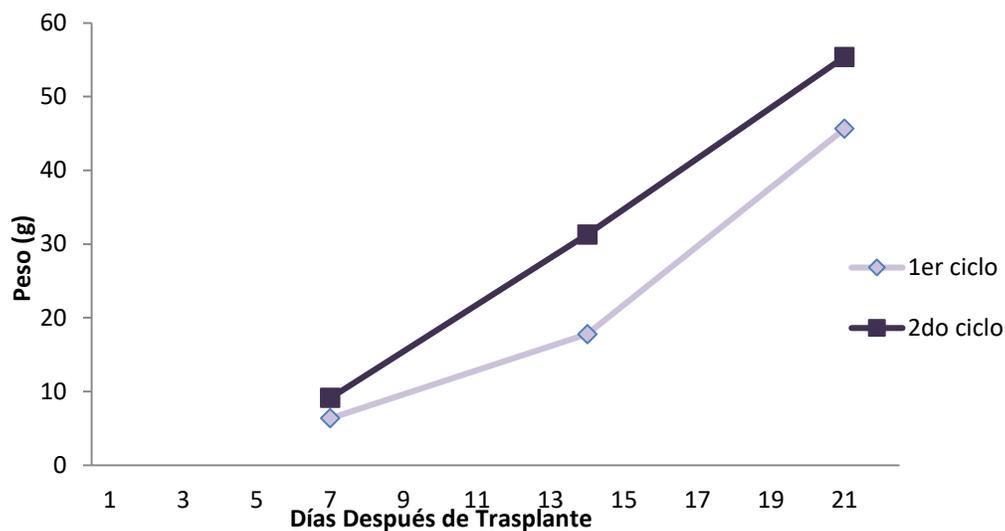


Figura 2. Peso fresco promedio del cultivo de rúcula.

Cuadro 2. Análisis foliar del cultivo de rúcula

CICLO	DDT	PESO			CONCENTRACIÓN		ABSORCIÓN	
		g		%	%		Kg ha ⁻¹	
		PF	PS	MS	N	K	N	K
1	7	6,4	0,4	5,7	5,7	4,6	8,1	6,6
	14	17,8	1,3	7,2	5,3	4,2	26,9	21,2
	21	45,6	2,9	6,4	5,3	4,5	61,4	52,1
2	7	9,1	0,6	6,8	5,4	6,5	13,3	15,9
	14	31,3	2,4	7,8	4,8	5,8	46,3	56,3
	21	55,4	4,8	8,6	4,4	5,9	81,9	110,4

Anexo 3. Radiación solar en el primer ciclo de cultivo.

Cuadro 3. Radiación solar ($MJ m^{-2} día^{-1}$) para el primer ciclo de cultivo.

1er ciclo						
Fecha	Exterior		Invernadero F1 (Lechuga)		Invernadero K2 (Rúcula)	
	Radiación diaria	Radiación diaria acumulada	Radiación diaria	Radiación diaria acumulada	Radiación diaria	Radiación diaria acumulada
	<i>(MJ m²⁻¹ día⁻¹)</i>					
8/4/2019	11,66	11,66	6,2	6,2	7,6	7,6
9/4/2019	18,89	30,55	10,0	16,2	12,3	19,9
10/4/2019	17,63	48,18	9,3	25,5	11,5	31,3
11/4/2019	5,41	53,59	2,9	28,4	3,5	34,8
12/4/2019	14,24	67,83	7,5	36,0	9,3	44,1
13/4/2019	18,46	86,29	9,8	45,7	12,0	56,1
14/4/2019	10,84	97,13	5,7	51,5	7,0	63,1
15/4/2019	8,65	105,78	4,6	56,1	5,6	68,8
16/4/2019	17,59	123,37	9,3	65,4	11,4	80,2
17/4/2019	16,20	139,57	8,6	74,0	10,5	90,7
18/4/2019	15,92	155,49	8,4	82,4	10,3	101,1
19/4/2019	15,88	171,37	8,4	90,8	10,3	111,4
20/4/2019	17,14	188,52	9,1	99,9	11,1	122,5
21/4/2019	16,53	205,05	8,8	108,7	10,7	133,3
22/4/2019	8,62	213,67	4,6	113,2	5,6	138,9
24/4/2019	16,77	230,44	8,9	122,1	10,9	149,8
25/4/2019	12,30	242,75	6,5	128,7	8,0	157,8
26/4/2019	4,96	247,70	2,6	131,3	3,2	161,0
28/4/2019	18,41	266,11	9,8	141,0	12,0	173,0
29/4/2019	14,27	280,39	7,6	148,6	9,3	182,3
30/4/2019	10,33	290,71	5,5	154,1		
1/5/2019	14,83	305,54	7,9	161,9		
2/5/2019	11,15	316,69	5,9	167,8		
3/5/2019	11,44	328,13	6,1	173,9		
4/5/2019	7,50	335,64	4,0	177,9		
5/5/2019	2,06	337,70	1,1	179,0		
6/5/2019	13,76	351,46	7,3	186,3		
7/5/2019	12,29	363,75	6,5	192,8		

8/5/2019	8,66	372,41	4,6	197,4		
9/5/2019	5,49	377,90	2,9	200,3		
10/5/2019	7,09	384,99	3,8	204,0		
11/5/2019	4,59	389,58	2,4	206,5		
12/5/2019	13,73	403,31	7,3	213,8		
13/5/2019	13,01	416,33	6,9	220,7		
14/5/2019	11,75	428,08	6,2	226,9		
15/5/2019	12,96	441,03	6,9	233,7		
16/5/2019	13,04	454,08	6,9	240,7		
17/5/2019	11,49	465,57	6,1	246,8		
18/5/2019	9,57	475,14	5,1	251,8		
19/5/2019	5,82	480,96	3,1	254,9		
20/5/2019	4,10	485,05	2,2	257,1		
21/5/2019	0,54	485,60	0,3	257,4		

Anexo 4. Radiación solar en el segundo ciclo de cultivo.

Cuadro 4. Radiación solar ($MJ m^{-2} día^{-1}$) para el segundo ciclo de cultivo.

2do ciclo						
DDT	Exterior		Invernadero F1 (Lechuga)		Invernadero K2 (Rúcula)	
	Radiación diaria	Radiación diaria acumulada	Radiación diaria	Radiación diaria acumulada	Radiación diaria	Radiación diaria acumulada
	<i>(MJ m⁻² día⁻¹)</i>					
14/1/2021	6,50	6,50	3,4	3,4		
15/1/2021	7,10	13,60	3,8	7,2		
16/1/2021	31,62	45,22	16,8	24,0		
17/1/2021	31,06	76,28	16,5	40,4		
18/1/2021	24,68	100,96	13,1	53,5		
19/1/2021	29,78	130,75	15,8	69,3		
20/1/2021	27,58	158,32	14,6	83,9		
21/1/2021	17,58	175,90	9,3	93,2		
22/1/2021	22,13	198,03	11,7	105,0		
23/1/2021	30,67	228,70	16,3	121,2	0,0	0,0

24/1/2021	30,06	258,76	15,9	137,1	19,5	19,5
25/1/2021	27,87	286,63	14,8	151,9	18,1	37,7
26/1/2021	29,52	316,15	15,6	167,6	19,2	56,8
27/1/2021	30,73	346,88	16,3	183,8	20,0	76,8
28/1/2021	31,10	377,98	16,5	200,3	20,2	97,0
29/1/2021	26,07	404,05	13,8	214,1	16,9	114,0
30/1/2021	24,56	428,61	13,0	227,2	16,0	129,9
31/1/2021	30,68	459,29	16,3	243,4	19,9	149,9
1/2/2021	30,05	489,33	15,9	259,3	19,5	169,4
2/2/2021	28,58	517,92	15,1	274,5	18,6	188,0
3/2/2021	29,47	547,39	15,6	290,1	19,2	207,1
4/2/2021	26,27	573,65	13,9	304,0	17,1	224,2
5/2/2021	25,06	598,71	13,3	317,3	16,3	240,5
6/2/2021	21,97	620,68	11,6	329,0	14,3	254,8
7/2/2021	20,57	641,25	10,9	339,9	13,4	268,2
8/2/2021	21,06	662,32	11,2	351,0	13,7	281,9
9/2/2021	24,15	686,47	12,8	363,8	15,7	297,6
10/2/2021	22,10	708,57	11,7	375,5	14,4	311,9
11/2/2021	21,34	729,91			13,9	325,8
12/2/2021	26,84	756,75			17,4	343,2
13/2/2021	27,67	784,42			18,0	361,2

Anexo 5. Temperatura y % de humedad relativa del primer ciclo.

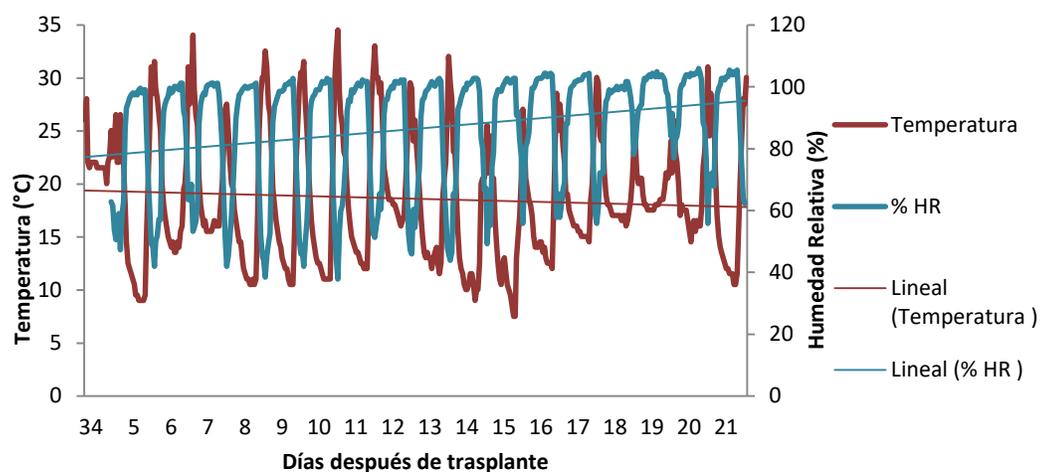


Figura 3. Temperatura y %HR del ambiente dentro del invernadero K2, en el cultivo de rúcula del ciclo 1.

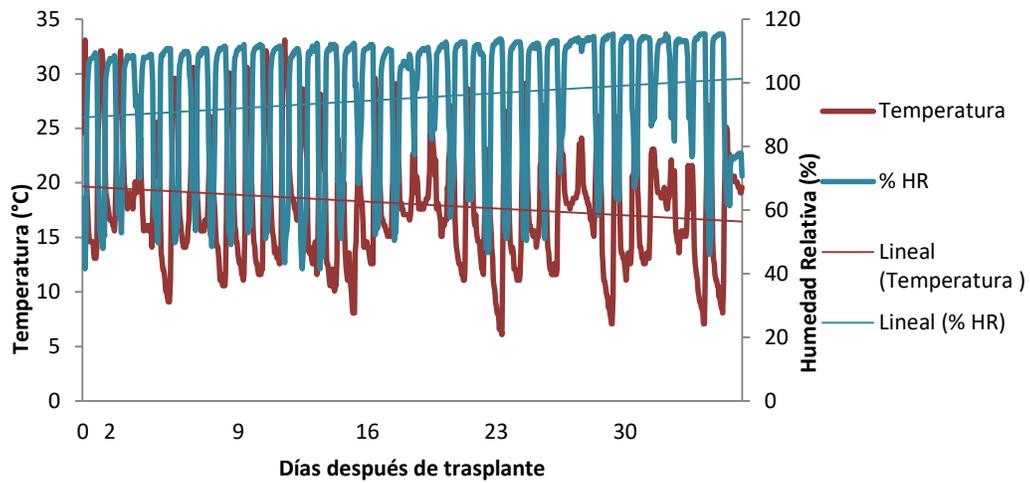


Figura 4. Temperatura y %HR del ambiente dentro del invernadero F1, en el cultivo de lechuga del ciclo 1.

Anexo 6. Temperatura y % de humedad relativa del segundo ciclo.

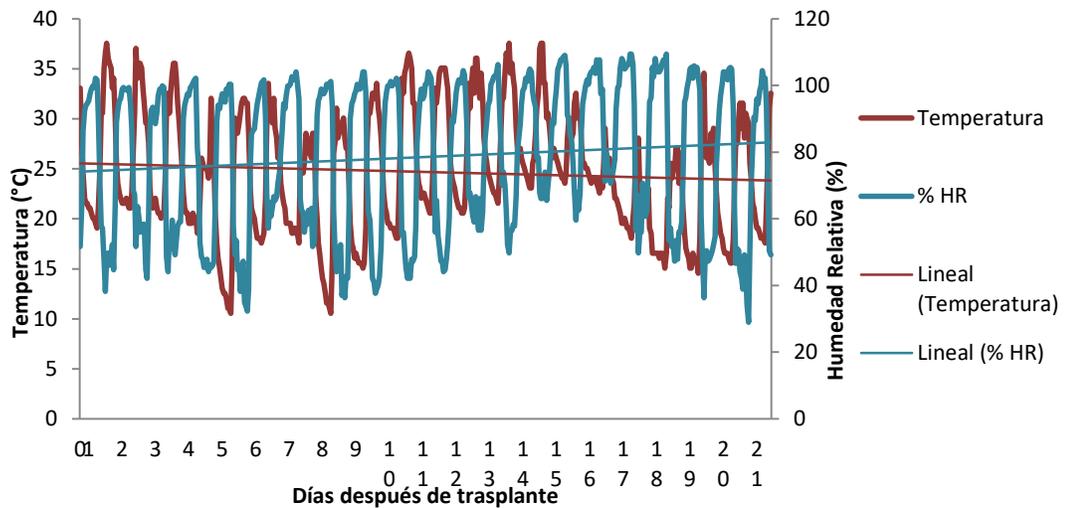


Figura 5. Temperatura y %HR del ambiente dentro del invernadero K2, en el cultivo de rúcula del ciclo 2.

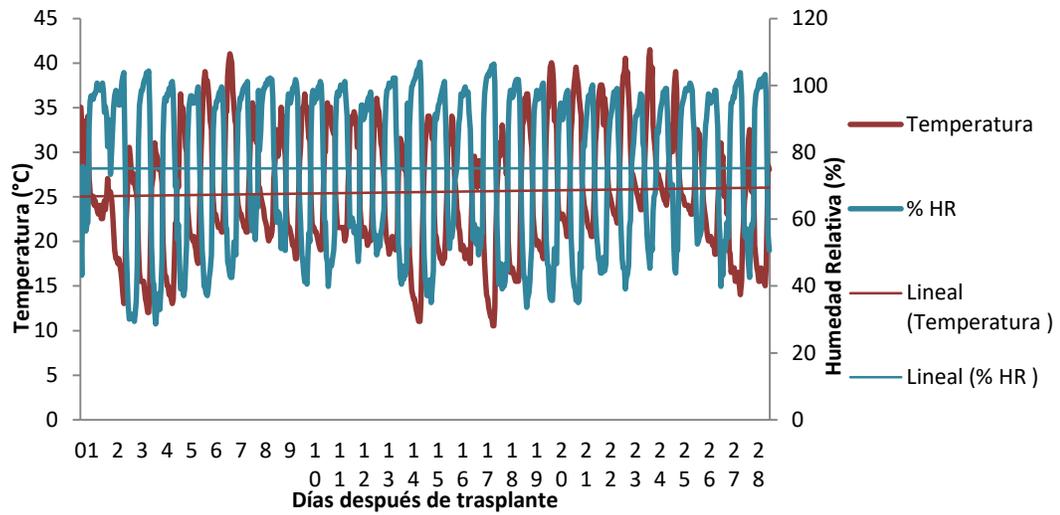


Figura 6. Temperatura y %HR del ambiente dentro del invernadero F1, en el cultivo de lechuga del ciclo 2.